

# 气吹弧装置仿真与试验研究

唐佳雄

(国网四川省电力公司广安供电公司, 四川 广安 638000)

**摘要:** 并联间隙雷击闪络后能快速疏导电弧保护绝缘子,但无法有效切除后续工频续流。因此,基于“气吹弧”思想研究设计了一种应用于高压输电线路的气吹弧装置。该装置与绝缘子串并联安装,当雷击线路时利用绝缘配合先于绝缘子击穿闪络泄放雷电流入地,并同时利用雷电脉冲信号触发灭弧气丸产生高速气流,能够在继电保护装置最快响应动作前熄灭电弧。通过仿真在理想状态下得出该装置能够在4 ms内将20 kA的工频续流熄灭;通过试验得出该装置能够在2.6 ms内将5.1 kA的续流电弧熄灭。仿真与试验结果基本一致,共同验证了所设计气吹弧装置具有良好的灭弧效果。

**关键词:** 并联间隙; 工频续流; 绝缘配合; 雷电脉冲信号; 灭弧气丸; 继电保护装置

**中图分类号:** TM 862 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)02-0058-06

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20240210

## Simulation and Experimental Research on Air-blowing Arc Device

TANG Jiexiong

(State Grid Guang'an Electric Power Supply Company, Guang'an 638000, Sichuan, China)

**Abstract:** After the lightning flashover in parallel gaps, the insulator can be protected while the arc being dredged quickly, but it cannot effectively cut off the subsequent power frequency follow current. Therefore, based on the concept of "gas blowing arc", a kind of gas-blowing arc device is designed for HV transmission lines. The device is installed in parallel with the insulator string, and when lightning strikes the line, the gap uses insulation coordination to discharge lightning current into the ground before the insulator breakdown and flashover, and at the same time, with the usage of lightning pulse signal, the arc extinguishing gas pill is triggered to generate high-speed airflow. In this way, the arc can be extinguished before the work of relay protection device. Under ideal conditions, the simulations show that the device can extinguish 20 kA power frequency follow current within 4 ms, and the experiments show that the device can extinguish 5.1 kA power frequency follow current arc within 2.6 ms. The results of simulations and experiments are basically consistent, which jointly verify that the air-blowing arc device has good arc extinguishing effect.

**Key words:** parallel gap; power frequency follow current; insulation coordination; lightning pulse signal; arc extinguishing gas pill; relay protection device

## 0 引言

输电线路具有分布广以及结构、地理环境复杂等特点。据统计,中国南方雷电活动频繁地区输电线路因雷击造成的跳闸事故数量占到总数的60%~85%,给当地造成巨大的经济损失<sup>[1]</sup>。并且温室效应导致全球气候变暖,雷电活动更加频繁,雷电强度明显增

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51467002)

加,这对线路正常运行有着更加严峻的考验。

目前针对输电线路的防雷主流措施分为堵塞式和疏导式<sup>[2-3]</sup>。堵塞式防雷措施主要采用加强线路绝缘、架设避雷线、安装避雷器和降低杆塔接地电阻等手段以限制线路雷电过电压、降低雷击闪络概率;虽能一定程度降低线路雷击跳闸率和事故率,但由于防雷措施自身限制和地理因素等原因,输电线路雷击跳闸仍频繁发生<sup>[4-6]</sup>。疏导式防雷措施通过安装防

弧工具、放电钳位绝缘子和保护间隙等装置以改变雷击闪络路径和疏导工频电弧防止电弧灼烧绝缘子和导线,但并不能有效降低雷击跳闸率<sup>[7-8]</sup>。

根据上述研究现状,下面基于“气吹弧”思想设计了一种能快速灭弧的气吹弧装置。该装置应用于高压输电线路,能避免降低线路耐雷水平且具有多次灭弧等优点。该设计的核心思想是允许线路遭受雷击并疏导巨大雷击电流沿电弧闪络通道入地,同时利用雷电脉冲信号触发灭弧气丸产生高速气流熄灭电弧,从而保护线路和绝缘子免遭雷击。首先,基于磁流体动力(magneto hydro dynamic, MHD)理论建立了气流耦合电弧的控制方程,并利用COMSOL Multiphysics软件对气流熄灭电弧过程进行了仿真分析;然后,利用冲击耦合工频的联合试验回路进行工频续流遮断试验,仿真和实验结果均验证了该装置具有快速灭弧的效果。

## 1 气吹弧装置安装及灭弧原理

### 1.1 气吹弧装置的安装

图1是气吹弧装置安装示意图。气吹弧装置由装置本体和下电极组成,装置本体通过螺栓固定于铁塔上,下电极通过螺栓安装在导线上。装置本体与下电极并联安装于绝缘子串旁。为使电弧闪络点准确地定位于装置本体和下电极之间的间隙中,必须使装置本体与下电极间隙距离不得低于绝缘子串长度的80%,且装置本体要和下电极对齐,以便气流更好作用于电弧。

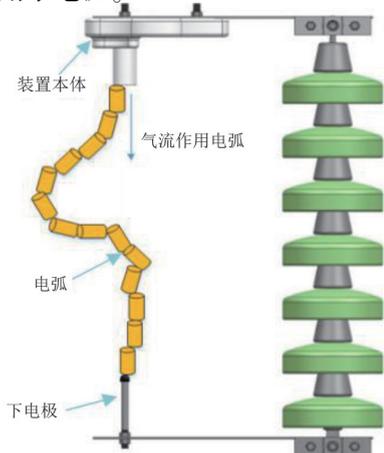


图1 气吹弧装置的安装

### 1.2 气吹弧装置灭弧原理

气吹弧装置是在传统保护间隙的基础上增加了灭弧模块,建立了“冲击疏导—快速灭弧—工频阻塞”模式。冲击疏导即雷击电流通过冲击疏导模式在指定通道(装置本体与下电极中的间隙)上闪络释放,使雷电能量顺势疏导泄入大地减少其破坏力,同时降低绝缘子串两端电压避免绝缘子闪络。快速灭弧即在冲击闪络电弧形成的同时,雷电脉冲激活装置本体中灭弧气丸内的固相炸药爆炸产生高速高压的气流,形成建弧与截弧起点的同步性;利用快速灭弧模式中截弧响应时间远小于建弧时间使气流完全截断电弧。工频阻塞即利用全空气介质在超强气流作用下的绝缘极速恢复性,快速地恢复全间隙介质强度;控制气流持续时间和强度作用于喷口与下电极间残存电弧,消除工频电弧重燃。

电弧的熄灭在于电弧输入能量和散失能量之间的竞争。电弧的输入能量可表达为

$$W_i = P_h(t) \quad (1)$$

式中: $W_i$ 为电弧输入能量; $P_h$ 为电弧输入功率; $t$ 为电弧持续时间。

电弧的输出能量可表达为

$$W_o = (P_T + P_S + P_K)l t \quad (2)$$

式中: $W_o$ 为电弧输出能量; $P_T$ 、 $P_S$ 、 $P_K$ 分别为传导散热功率、辐射散热功率、对流散热功率; $l$ 为电弧长度。

当 $W_i < W_o$ 时,电弧输出能量大于电弧输入能量,电弧不能维持其形态就会熄灭。而气吹弧装置灭弧的关键则是利用超强气流加速电弧的对流散热,迫使电弧输出能量急剧增加,加快电弧的熄灭。电弧的对流散热功率表达式为

$$P_K = \frac{\pi}{4} v d^2 \int_{T_0}^{T_c} c dT \quad (3)$$

式中: $v$ 为气流速度; $d$ 为电弧直径; $c$ 为气体热容系数; $T$ 为电弧温度; $T_0$ 为空气起始温度; $T_c$ 为电弧平均温度。

试验表明,在一个大气压的情况下,空气的单位体积热容系数和温度之间关系可近似表示为

$$c = \frac{0.41}{T} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中,得

$$\int_{T_0}^{T_c} c dT = \int_{T_0}^{T_c} \frac{0.41}{T} dT = 0.41 \ln \frac{T_c}{T_0} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)中,得

$$P_k = \frac{\pi}{4} v d^2 \times 0.41 \times \ln \frac{T_c}{T_0} = 0.322 v d^2 \ln \frac{T_c}{T_0} \quad (6)$$

从式(6)可以看出:气流速度  $v$  与对流散热功率  $P_k$  成正比; $v$  与  $T_c$  和  $d$  成反比。电弧被气流截断后,由于灭弧筒的空间约束,将在电弧断口附近形成一股高压气流团。 $v$  越大,则  $d$  越小, $P_k$  越大,可加速电弧的对流耗散。同时电弧熄灭后气流使电弧通道失去再次电离的条件而不会引起热电离效应,破坏了自持放电条件,避免电弧重燃。

## 2 仿 真

### 2.1 仿真几何模型及初始化条件

利用 COMSOL Multiphysics 软件模拟在理想环境状态下,向气吹弧装置本体与电极之间的间隙施加幅值为 50 kA 的雷电流,间隙击穿闪络形成电弧后触发灭弧气丸产生气流,接续工频电弧通道内流过工频电流幅值为 20 kA,装置本体内部及电极间的高速气流作用于电弧。图 2 是气吹弧装置仿真几何模型网格剖分图,图中装置底部灭弧圆筒为气流作用于电弧位置之处;图 3 是双指数雷电流波形;图 4 是工频电流波形。

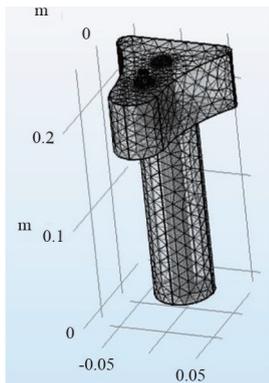


图 2 气吹弧装置本体仿真几何模型网格剖分

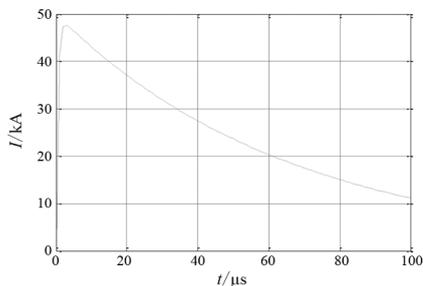


图 3 幅值为 50 kA 的双指数雷电流波形

双指数雷电流脉冲波形为

$$i_L(t) = A I_L (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (7)$$

式中: $I_L$  为雷电流幅值,50 kA; $A$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  为系数,由雷电流波形确定。

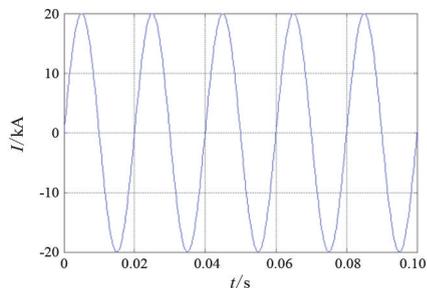


图 4 幅值为 20 kA 的工频电流波形

### 2.2 基于 MHD 的气吹电弧模型

利用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件中内嵌 MHD 磁流体方程组对气吹弧过程进行数值计算。为满足仿真求解要求,需要对电弧提出以下假设<sup>[9-11]</sup>:1) 电弧是一种高温电离气体,且处于层流状态;2) 电弧等离子体处于局部热力学平衡;3) 忽略粘性耗散和重力对电弧流动的影响。

假设电弧满足前提条件,则建立 MHD 控制方程组。

#### 1) 流场控制方程组

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \cdot \text{div } v = 0 \quad (8)$$

动量守恒方程为

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\Delta P + JB + \mu \nabla^2 v + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla \cdot v) \quad (9)$$

能量守恒方程为

$$\rho \left( \frac{dh}{dt} - \frac{dP}{dt} \right) = \delta E^2 - e_{\text{net}} + \text{div}(\lambda \text{grad } T) \quad (10)$$

气体状态方程为

$$P = \rho RT \quad (11)$$

式中: $\rho$  为电弧等离子体的密度; $P$  为气流压力; $J$  为电弧电流密度; $B$  为磁感应强度; $\mu$  为动力粘性系数; $h$  为电弧的焓; $\delta$  为电弧电导率; $e_{\text{net}}$  为电弧辐射能量值; $E$  为电弧电场强度; $R$  为气体常数。

#### 2) 电磁场计算

由于感应电场和感应电流很小,可以忽略。根据麦克斯韦方程组,电场计算方程为

$$\text{div}(\delta \text{grad } \varphi) = 0 \quad (12)$$

式中, $\varphi$  为电弧电位。

相应电流密度和电场强度为:

$$E = -\text{grad } \varphi \quad (13)$$

$$J = \delta E \tag{14}$$

### 2.3 气流耦合电弧仿真分析

磁场计算为:

$$\nabla \cdot A = B \tag{15}$$

$$\nabla^2 A = \mu_0 J \tag{16}$$

式中: $A$  为磁矢势; $\mu_0$  为真空磁导率。

图 5 和图 6 分别为气吹弧装置本体与电极间气流耦合电弧过程中的电弧电导率和气流速度变化过程。电弧电导率表示电弧能量强弱,气流速度表示灭弧能量的水平。

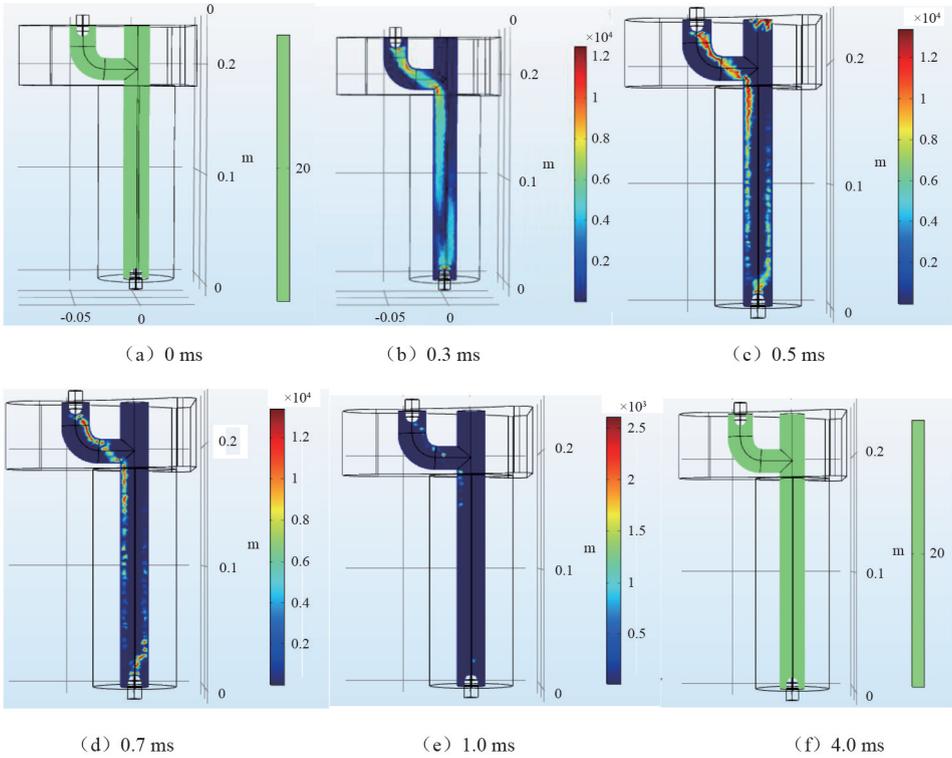


图 5 电导率变化过程

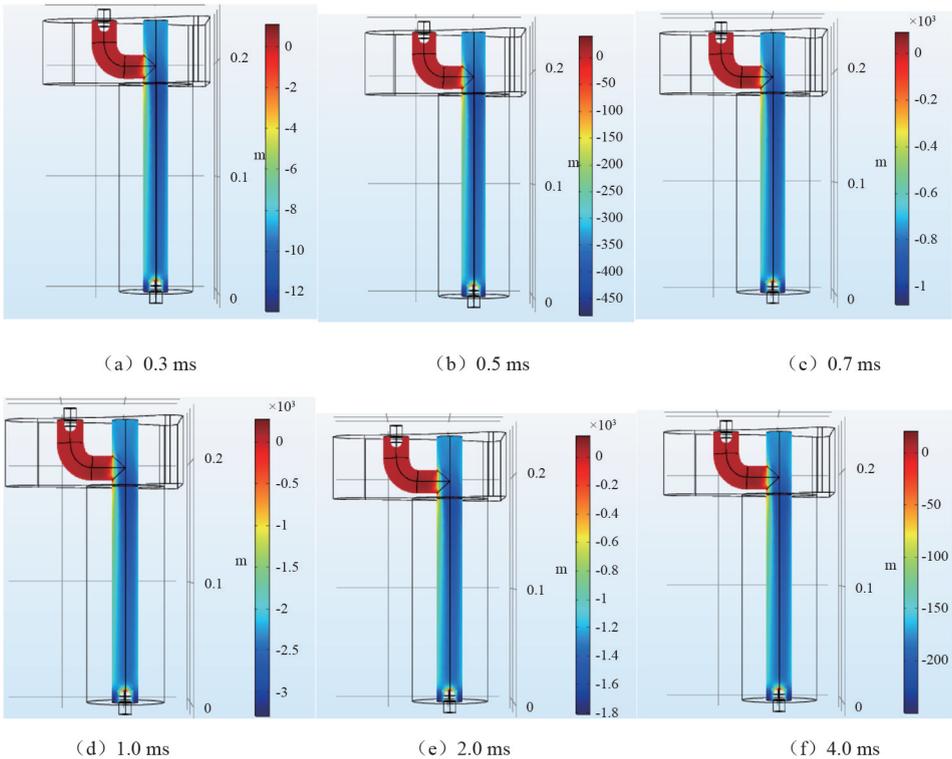


图 6 气流速度变化过程

1)  $t=0\sim 0.3$  ms 为雷电击中线路阶段。此时装置与下电极长空气间隙被击穿,工频电流沿雷击通道形成短路,雷电脉冲和工频电流实现耦合,低温空气介质转化为高温闪络电弧,电弧已经贯穿于整个灭弧通道内,电弧电导率已经达到  $1.2\times 10^4$  S/m。

2)  $t=0.3$  ms 时,雷电释放的脉冲电流触发气吹弧装置开始产生气流。而气流最初时刻能量较弱,无法有效抑制电弧能量的发展。

3)  $t=0.3\sim 0.5$  ms 时,冲击电弧开始与气流耦合。此刻电弧外表明亮态呈发展阶段,灭弧筒内电弧能量逐渐变强,同时气流速度逐渐递增。

4)  $t=0.5\sim 1.0$  ms 为电弧耦合气流过程最为强烈的阶段。此阶段气流速度快速增长,到 1.0 ms 时达到巅峰,灭弧筒内部分气流速度达到 1000 m/s;而电弧在气流的作用下被撕裂为若干段非连续的小电弧,电弧能量不断降低,到 1.0 ms 时电弧电导率仅为  $2.5\times 10^3$  S/m。

5)  $t=1.0\sim 4.0$  ms 时,气流能量和电弧能量大幅度降低,且电弧降低趋势较气流更为猛烈,到 4.0 ms 时电弧耦合气流已经基本停止,电弧也已经熄灭。而灭弧筒内存在残留导电粒子,在外部电源能量输入下电弧仍可能重燃,但在 4.0 ms 时灭弧筒内部分区域还存在气流,能有效阻止电弧重燃,杜绝间隙再次击穿的可能。

### 3 工频续流遮断试验

#### 3.1 试验准备及步骤

为了研究气吹弧装置的实际灭弧效果,搭建了能产生冲击电流耦合工频电流的联合试验平台,以模拟气吹弧过程,图 7 是联合试验回路。图 7 中: $C$  为冲击电压发生装置主电容; $R_f$  为波头电阻; $R_l$  为波尾电阻; $S$  为点火球隙;MOA1 和 MOA2 为避雷器; $T_0$  为试品(即气吹弧装置);CT 为电流互感器;TT 为工频变压器; $R_p$  为保护电阻; $S_1$ 、 $S_2$  为保护球隙; $C_5$  为电容器电容; $C_1$ 、 $C_3$  为高压臂电容; $C_2$ 、 $C_4$  为低压臂电容; $L$  为电感; $V$  为数字电压表;DIVMS 为数字电压测量系统。

试验主要步骤为:1) 选择位置合适的机位固定高速摄像机,调整气吹弧装置和下电极的间隙距离以符合试验需要;2) 对冲击电压发生装置主电容进

行预充电,并逐渐升高冲击放电电压幅值直到能击穿长空气间隙;3) 冲击电压发生装置充电完成后,立即点火向气吹弧装置输出冲击电压和冲击电流;4) 冲击电压击穿长间隙形成电弧后,立即启动工频试验变压器向试品输出工频电压和工频电流;5) 电弧熄灭后再向试品输出工频电压以检测长间隙处的电弧是否重燃。

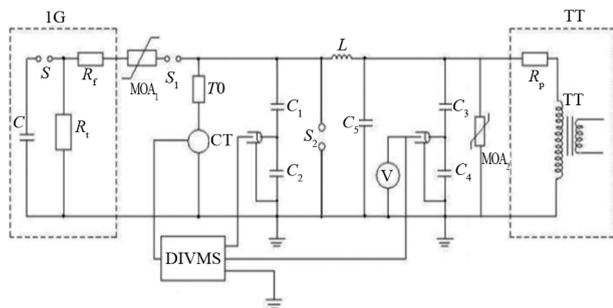


图 7 联合试验回路

#### 3.2 试验结果及分析

图 8 所示为气吹弧装置灭弧全过程。从 0.3 ms 冲击电压发生装置击穿长空气间隙后,在绝缘子旁形成闪耀刺眼的电弧贯穿于整个灭弧通道,此时灭弧气丸也已触发产生高速气流;0.5 ms 时电弧被气流多点截断成非连续状,断口的出现使电弧中等离子体失去了能量供给,电弧不能继续扩大,而此时强气流很快就会充满整个灭弧通道。0.5~2.0 ms 为气流速度增长-衰减阶段;1 ms 时气流速度明显大幅度增长,向下喷射出艳红色火焰状高速气流,由于灭弧通道约束使气流能量更加集中,能加速电弧的对流散热;1.5 ms 时,气流速度达到最大值,裹挟多段小电弧向下运动;2 ms 时,电弧已经基本熄灭,但此刻灭弧通道内仍存在少许气流,能有效抑制电弧重燃;2.6 ms 时电弧已经完全熄灭且未重燃。试验中气吹弧装置灭弧过程和仿真中的灭弧过程基本相同,一致表明气吹弧装置的灭弧性能优良。

图 9 为试验采集到的工频电流波形,图中:CH1 为工频电压波形;CH2 为工频电流波形。可以看出:工频电流幅值在 1.3 ms 时达到峰值,但在强气流持续作用下,工频电流能量迅速降低,电弧仅维持 2.6 ms 就已经熄灭,工频电流幅值被限制在 5.1 kA 左右。在工频电流切断后立即启动工频变压器向试品施加工频电压,经检测电弧并未重燃。

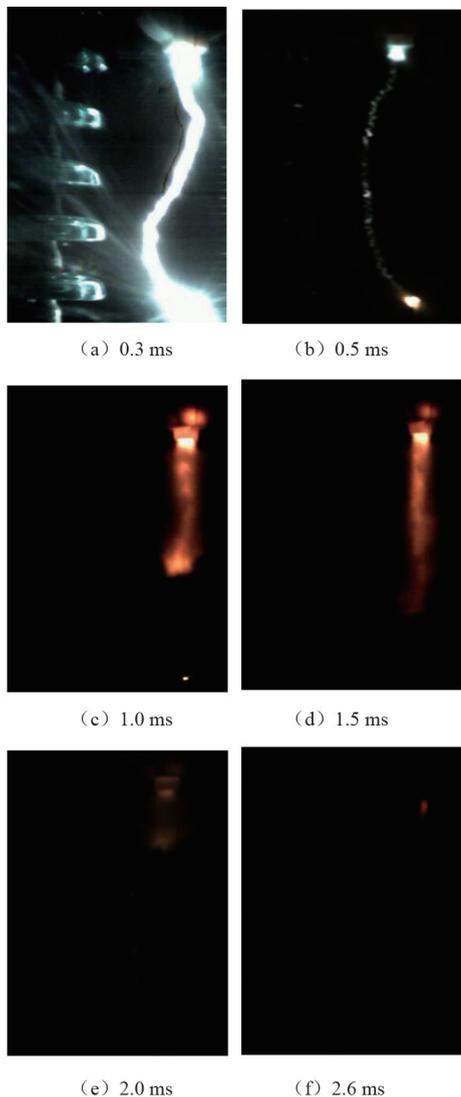


图8 装置熄灭电弧过程

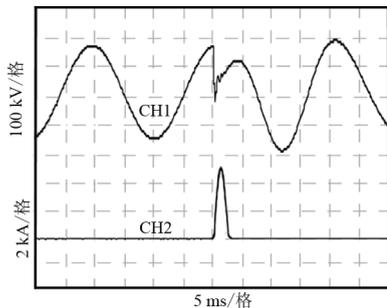


图9 工频续流遮断波形

## 4 结论

1)气吹弧装置能够先于绝缘子击穿闪络将巨大雷击能量疏导入地,并同时利用雷电脉冲信号触发灭弧气丸产生高速气流快速熄灭电弧,为电力系

统稳定运行保驾护航。

2)利用 COMSOL Multiphysics 软件搭建的三维模型仿真,得出近似理想状态下高速气流可以在 4.0 ms 内熄灭幅值为 20 kA 的电弧。

3)所进行的冲击与工频相联合的试验,得出装置灭弧过程与仿真所得过程基本一致,试验结果显示装置能够在 2.6 ms 内将幅值为 5.1 kA 的工频续流熄灭,并经过检验发现电弧并未重燃。

## 参考文献

- [1] 贾磊,舒亮,郑士普,等.计及工频电压的输电线路耐雷水平的研究[J].高电压技术,2006,32(11):111-114.
- [2] 何金良,曾嵘,陈水明.输电线路雷电防护技术研究(三):防护措施[J].高电压技术,2009,35(12):2917-2923.
- [3] 曾嵘,周旋,王泽众,等.国际防雷研究进展及前沿述评[J].高电压技术,2015,41(1):1-13.
- [4] 赵远强,吴慧芳.输电线路“差异化”防雷治理的技术措施综述[J].山西电力,2015(1):41-45.
- [5] 郝帅.高土壤电阻率地区牵引变电所降低接地电阻的措施探讨[J].电瓷避雷器,2015(2):124-127.
- [6] 司文荣,王逊峰,莫颖涛,等.110 kV 复合外套金属氧化锌避雷器爆炸故障分析[J].电磁避雷器,2018(1):163-169.
- [7] 罗真海,陈勉,陈维江,等.110 kV、220 kV 架空输电线路复合绝缘子并联间隙防雷保护研究[J].电网技术,2002,26(10):41-47.
- [8] 陈维江,孙昭英,王晓刚,等.10 kV 架空绝缘线路用防弧金具及放电箱位绝缘子的工频电弧试验条件[J].电网技术,2005,29(17):5-7.
- [9] 吴翊,荣命哲,杨茜,等.低压空气电弧动态特性仿真及分析[J].中国电机工程学报,2005,25(21):143-148.
- [10] ZHAINAKOV A, URUSOV R M. Three-dimensional mathematical model for the calculation of electric-arc plasma flows[J]. High Temperature, 2002,40(1):9-14.
- [11] FRETON P, GONZALEZ J J, GLEIZES A. Comparison between a two-and a three-dimensional arc plasma configuration[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(19):2442-2452.

作者简介:

唐佳雄(1997),男,硕士,研究方向为电力系统防雷接地。

(收稿日期:2023-06-03)