

10 kV 线路防雷用反冲多间隙结构灭弧装置 理论与试验研究

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:针对配电网线路易受雷击引起绝缘子闪络造成线路停电的难题,文中研究了一种基于“疏导-灭弧式”思想的反冲多间隙结构灭弧装置。该装置利用绝缘配合先于绝缘子击穿闪络泄放雷电流入地,同时利用其反冲结构和多断口结构迅速熄灭电弧。首先,对装置的结构和灭弧原理进行了介绍;然后,对反冲结构和多断口结构的灭弧过程用数学模型进行了描述;接着,探讨了影响电弧熄灭的主要因素,得出提高气流速度是提高灭弧效率和缩短灭弧时间的有效方式;最后,通过工频大电流灭弧试验论证了该装置具有良好的灭弧效果,能够在4 ms内将幅值为2 kA的电弧熄灭,并且该装置在4片绝缘伞裙下也能控制电弧进入其内部。

关键词:配电网;闪络;绝缘配合;电弧;气流速度

中图分类号:TM 86 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)01-0012-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230103

Theoretical and Experimental Study on Arc Extinguishing Device with Multi-gap Structure against Lightning for 10 kV Line

TANG Jiexiong

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

Abstract: Aiming at the difficult problem that the lines of distribution network are subject to lightning stroke which causes insulator flashover resulting in power failure, a device called arc extinguishing device with multi-gap structure is studied based on the idea of "dredging-arc extinguishing". The device uses insulation coordination to discharge lightning current into the ground before insulator breakdown, and at the same time, uses its recoil structure and multi-fracture structure to extinguish the arc rapidly. Firstly, the structure and arc extinguishing principle of the device are introduced. And then the arc extinguishing process of recoil structure and multi-fracture structure are described by mathematical model. And next, the main factors that affect the arc extinction are discussed, and it is concluded that increasing gas velocity is an effective way to improve the arc extinction efficiency and shorten the arc extinction time. Finally, the arc extinguishing test with high power frequency current proves that the proposed device has good arc extinguishing effect, and can extinguish the arc with 2 kA in 4 ms, and under four pieces of insulator shed, this device can also control the arc to get into its interior.

Key words: distribution network; flashover; insulation coordination; electric arc; air velocity

0 引言

近年来随着电网规模的不断扩大,配电网线路长度和走廊宽度不断增加,高杆塔、大档距、交叉跨越、同塔多回、导线换相等情况出现得越来越多,雷

基金项目:国家自然科学基金项目(51467002)

击线路造成的事故也逐渐增多^[1]。当雷电流超过线路耐雷水平时易发生绝缘闪络,接续产生的工频续流会灼烧绝缘子和线路,引起绝缘子破裂和线路断线等事故^[2]。因此,提高配电网线路防雷水平对于电力系统安全运行具有十分重要的意义。

目前针对配电网线路防雷,主要有架设避雷线、降低杆塔接地电阻、架设耦合地线、采用不平衡绝缘和安装避雷器等阻塞型措施^[3-4]。这些防雷措施能

够在一定程度上提高线路防雷性能和减少雷击跳闸率。但由于地理环境和防雷手段自身运用受限,配电网线路遭受雷击事故仍不断发生。并联间隙是配电网线路疏导型防雷措施的有力补充,但其在多次动作后电极会严重烧蚀,使绝缘配合劣化^[5]。同时自动重合闸频繁动作会对变压器、断路器等电气设备造成严重的过电压冲击,使系统绝缘耐受寿命缩短^[6]。

近些年来国内外学者相继研发出能够快速熄灭电弧的装置。文献[7-8]介绍了一种多断点结构灭弧装置,该装置利用断点结构将电弧多点截断,并利用电弧自身高温膨胀灭弧室内的气体产生气流将其喷出灭弧室;但该装置适用于熄灭较小雷击电弧,对较大雷击电弧仍束手无策。文献[9]研究了一种多间隙结构灭弧装置,该装置能在电流过零时将工频续流切断进而熄灭电弧;但该装置针对高电压等级线路需串联较多的间隙结构,会在较大程度上削弱线路的防雷性能,导致线路跳闸率不降反升。文献[10]介绍了一种多段微孔结构的防雷装置,该装置通过雷电击穿多球隙之间的电极,然后利用电弧加热灭弧室内的空气受热膨胀产生气流,在气流的带动下将电弧喷出;但该文献只做了相关的灭弧结构仿真分析,未见相关试验报道。文献[11]研制了一种多腔室防雷装置,该装置利用电弧自身高温烘烤装置内的有机材料以产生气流熄灭电弧;但该装置受制于多次动作后材料会消耗过快而导致后续产气能力弱难以熄灭电弧的情况。

针对上述配电网防雷措施在实际运用上均有一定的缺陷性,下面基于“疏导-灭弧式”思想提出了一种反冲多间隙结构灭弧装置,能够有效解决配电网线路雷击防护漏洞,为配电网线路防雷提供一种崭新的思路。该装置的核心思想是:允许线路遭受雷击,同时疏导巨大雷电冲击电流沿电弧闪络通道入地,并利用导弧电极吸引电弧进入装置内部,利用反冲结构产生反冲力将电弧从入口处喷出,阻断后续电弧进入管内;进入装置后的电弧被多点截断形成小电弧,管内空气受热膨胀产生纵吹气流将各处电弧全部喷出,从而保护线路和绝缘子免遭雷击。

1 反冲多间隙结构灭弧装置及原理

1.1 反冲多间隙结构灭弧装置的结构

图 1 是反冲多间隙结构灭弧装置平面剖面图,

该装置由反冲管、反射壁、压缩管、导弧电极、喷弧口、接地电极组成。反冲管和反射壁是耐高温绝缘材料制成,反冲管直径为 12 mm,长度为 60 mm,反射壁具有反射电弧的作用。压缩管直径为 8 mm,长度为 40 mm,由耐高温陶瓷制成。反冲管内的导弧电极长度为 2 mm,其余导弧电极直径为 4 mm,由导电性能较好的复合铜制材料制成;导弧电极具有诱导电弧进入反冲管内和通过库仑力作用约束工频电弧沿压缩管特定路径运动的作用。装置共有 5 片绝缘伞裙,每层伞裙间有两处喷弧口,喷弧口是压缩气流将电弧喷射出外界的出口。接地电极作用是泄放雷电冲击电流入地。

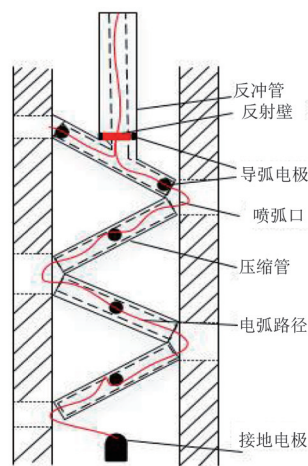


图 1 反冲多间隙结构灭弧装置平面剖面图

图 2 是反冲多间隙结构灭弧装置安装图。该装置与柱式绝缘子并联安装,用螺栓上下将其固定,装置接地端与线路绝缘子低压端相连。装置通过控制绝缘伞裙直径尺寸来增加电弧爬电距离,防止电弧沿面闪络。为保证雷电击中线路时,装置先于绝缘子击穿从而有效保护线路及绝缘子,装置的击穿电压必须低于绝缘子的击穿电压。因此,装置高压端与绝缘导线之间应保持一定的雷电冲击放电间隙,从而将雷电放电路径限制在装置内部。

1.2 反冲多间隙结构灭弧装置的灭弧原理

当线路正常运行时,装置承受的是正常工作电压,因而装置相当于绝缘体。而当雷电击中线路或杆塔时,雷电以波的形式沿杆塔两边传导,抵达装置后迅速击穿放电间隙形成电弧。装置灭弧可划分两个过程:1)反冲灭弧过程;2)压缩气流灭弧过程。这两个过程是同步发生、同步作用于电弧的。

当电弧被诱导至反冲管后,灭弧过程如下:1)一部

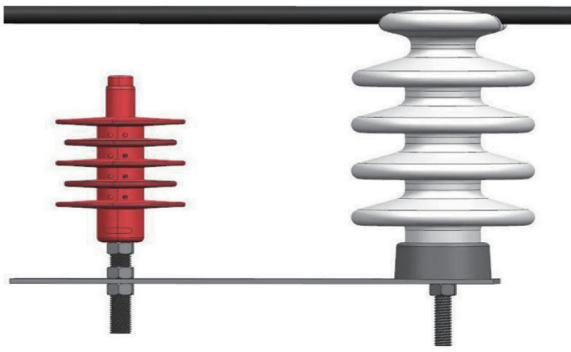


图 2 反冲多间隙结构灭弧装置安装

分电弧因受到壁面的反射,立即产生与入口电弧运动方向成 180° 的高温高密反射电弧,反射电弧迅速向反冲管外运动阻断后续电弧进入管内,打破后续灌注电弧的连续性,同时裹挟后续电弧一同喷出反冲管外。反射电弧能量与入口电弧能量成正比关系,入口电弧能量越大,产生的反射电弧能量越大,越有效阻断后续电弧的灌入。2) 与此同时另一部分电弧在导弧电极库仑力约束下进入装置主体,装置主体由一系列灭弧腔室按照特殊的空间排列方式构成,电弧沿装置内部特殊的空间结构运动,在各处断口被物理性强制多点折断成多条小电弧。小电弧在灭弧腔室内被极度挤压形成压缩态,电弧所受的径向压力转化为轴向压力。同时高温电弧加热腔室内的气体产生压缩气流,相邻管道之间的电弧由于气流对冲和急速弯折使电弧的突变拐点变为能量脆弱点,直接受到纵吹气流的作用,被强制沿喷嘴口喷射出外部空间,电弧与外部冷空气完成复合、置换成为绝缘介质,进而电弧熄灭。

2 冲击波和气流耦合电弧数学模型

由第 1.2 节可知,电弧进入装置后将同步经历两个灭弧过程,而这两个灭弧过程的灭弧原理又是完全不同的。针对上述两过程分别建立不同的数学模型,以用于描述两者不同的物理变化过程。

2.1 反冲电弧冲击波模型

电弧放电会引起高温电弧通道内存在温度和密度剧烈变化的等离子体,随着电弧通道内热量的释放,电弧通道以超音速向外膨胀挤压着电弧通道周围的气体产生冲击波^[12-14]。因此利用冲击波理论来描述反冲灭弧过程,将电弧通道能量视为爆炸源,在电弧压缩空气过程中形成冲击波。工频电弧

被电极诱导进入反冲管内,即视为有一冲击波以 D_1 的速度垂直向装置反射壁面入射,如图 3(a) 所示。冲击波波阵面前后参数的关系为:

$$D_1 - u_0 = v_0 \sqrt{\frac{p_1 - p_0}{v_0 - v_1}} \quad (1)$$

$$u_1 - u_0 = -\sqrt{(p_1 - p_0)(v_0 - v_1)} \quad (2)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{v_1}{v_0} = \frac{(k-1)p_1 + (k+1)v_0}{(k+1)p_0 + (k-1)v_0} \quad (3)$$

式中: D_1 为入射波波速; p_0 、 ρ_0 、 v_0 、 u_0 分别为冲击波入射时的初始压力、密度、比容、质点运动速度; p_1 、 ρ_1 、 v_1 、 u_1 分别为冲击波波阵面后的压力、密度、比容、质点运动速度; k 为绝热指数。

冲击波垂直入射到反冲装置的壁面后,由于壁面为刚性结构表面不会发生变形,冲击波会发生正反射,则波阵面后的气体流速 u_1 成为 0,壁面处的气体压力和密度也发生急剧变化。而此刻,流速为 u_1 的气体介质动能转化为静压势能,受到二次压缩的气体反过来作用于已被入射波压缩过的气体,即形成反射波远离壁面向反冲管外传播,如图 3(b) 所示。

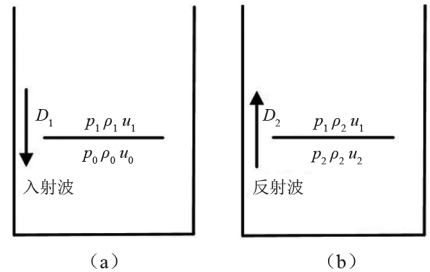


图 3 冲击波在壁面上的反射

由于反射波是已受入射波压缩过的气体介质传播的,则反射波传播后的参数可表示为:

$$D_2 - u_1 = -v_1 \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{v_1 - v_2}} \quad (4)$$

$$u_2 - u_1 = -\sqrt{(p_2 - p_1)(v_1 - v_2)} \quad (5)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{(k-1)p_2 + (k+1)p_1}{(k-1)p_1 + (k+1)p_2} \quad (6)$$

式中: D_2 为反射波波速; p_2 、 ρ_2 、 v_2 、 u_2 分别为反射波的压力、密度、比容、质点运动速度。

假设 $u_0 = 0$, 并且由壁面条件知 $u_2 = 0$, 即联合式(2)和式(4)可得

$$\sqrt{(p_1 - p_0)(v_0 - v_1)} = \sqrt{(p_2 - p_1)(v_1 - v_2)} \quad (7)$$

将式(7)两边平方整理后得

$$\frac{(p_1 - p_0)}{\rho_0} \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_1}\right) = \frac{(p_2 - p_1)}{\rho_1} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \quad (8)$$

将式(3)和式(6)代入式(8)中,可得

$$\frac{p_2}{\rho_1} = \frac{(3k - 1)p_1 - (k - 1)p_0}{(k - 1)p_1 - (k + 1)p_0} \quad (9)$$

式(9)即反射波波阵面压力和反射波波阵面压力的关系式。

当入射波压力很大时,由于 $p_1 \gg p_0$, 故 p_0 忽略不计,将式(9)简化为

$$\frac{p_2}{\rho_1} = \frac{3k - 1}{k - 1} \quad (10)$$

对于电弧压缩的气体 k 可取 1.4, 即得 $p_2 = 8p_1$, 这表明入射波在壁面反射后,反射波波阵面的压力是入射波波阵面压力的 8 倍。

将式(8)代入式(6)中,整理可得

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{kp_1}{(k - 1)p_1 + p_0} \quad (11)$$

对于冲击波压力较大的情况下, p_0 可以忽略,则有

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{k}{k - 1} \quad (12)$$

当 k 取 1.4 时,即得 $\rho_2 = 3.5\rho_1$, 这表明入射波经壁面反射后,反射冲击波阵面后介质密度能达到入射冲击波阵面后介质密度的 3.5 倍。特别对于很强的冲击波,理想气体介质压缩程度至少为 6 倍^[15], 由此 $\rho_2 = 21\rho_0$, 表明电弧经壁面反射后,反射电弧密度能达到入口电弧初始密度的 21 倍。

根据上述分析可知,刚进入反冲装置的电弧在受到壁面的反射后,产生压力、密度分别为入射时的 8 倍、21 倍。如此高压高密度反射电弧,对后续灌入管内的电弧造成巨大的破坏作用,阻断后续电弧的进入;同时强大反射电弧能够裹挟后续电弧共同喷出反冲管外,实现反冲管外灭弧。

2.2 压缩气流耦合电弧数学模型

电弧进入装置内,部分电弧会受到壁面反射回到装置外,另一部分电弧会进入装置内部。进入装置内部电弧会被多断口结构截断成若干小电弧,多条小电弧迅速加热腔室内部空气,气体受热膨胀气压增大,与外界形成气压差,高温气体带动电弧弧柱沿喷口向外喷出。在此采用磁流体动力学(magnetohydrodynamic, MHD)模型描述压缩气流

耦合电弧过程。

1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot u) = 0 \quad (13)$$

式中: ρ 为电弧密度; u 为压缩气流速度矢量。

2) 动量守恒方程

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = \nabla \cdot \left[-pI + \mu(\nabla \mu + (\nabla u)^T) \right] - \frac{2}{3} \mu(\nabla u)I \quad (14)$$

式中: p 为气体压强; I 为二阶单位张量; μ 为粘性系数。

3) 能量守恒方程

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{5k_B T}{2q} \right) (\nabla T \cdot J) + E \cdot J + Q_{\text{rad}} \quad (15)$$

式中: C_p 为恒压热容; λ 为导热系数; k_B 为玻尔兹曼常数; q 为电弧电荷; J 为电弧电流密度; E 为电弧场强; Q_{rad} 为辐射散热量; T 为温度。

4) 气体状态方程

$$p = \rho RT \quad (16)$$

式中, R 为气体常数。

5) 电流守恒方程

$$\begin{cases} \nabla \cdot (-\delta \nabla \varphi) = 0 \\ J = -\nabla \varphi \sigma - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma u \times B + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times B = J \mu_0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: σ 为电弧电导率; φ 为电弧电势; A 为磁矢位; D 为电场感应强度矢量; μ_0 为真空磁导率; t 为时间。

式(13)至式(17)表示压缩气流耦合电弧过程各种物理场的平衡关系。

3 影响交流电弧的熄灭因素

根据第 2.1 节分析可知,反冲灭弧过程仅与电弧能量存在正比关系,而腔室气流灭弧过程不仅与电弧能量有关,还与断口数量、腔室空间排列方式、相邻腔室形成的角度有关。下面进一步探讨灭弧腔室内影响电弧熄灭时间和灭弧效率的主导因素,对于进一步改进和提高装置的灭弧效率和缩短灭弧

时间具有指导性意义。

首先建立稳定燃烧的电弧功率方程式。

$$p_k = \rho c_p v \nabla T \quad (18)$$

式中： c_p 为热容系数； v 为电弧运动速度。

电弧运动过程中在受到自身重力影响作用下，电弧自身会产生对流现象。假如周围气流没有对电弧产生干扰，结合流体力学，有

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \rho g = 0 \quad (19)$$

式中： ∇p 为弧柱压力梯度； g 为重力加速度。

将式(19)移项，得

$$\nabla p = \rho g \quad (20)$$

由于电弧弧柱内的气体在电弧高温作用下，气体会温度急剧上升，同时密度会不断减小为 ρ' ，即

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\rho g + \rho' g = g(\rho' - \rho) < 0 \quad (21)$$

所以根据式(21)可知：电弧运动方向与重力方向相同，是因为装置内部的电极诱导电弧进入装置内部，电弧向下运动，所以电弧合力为竖直向下的。

腔室内冷空气受电弧加热膨胀形成纵向气流，因此对电弧实行纵吹。则电弧受纵向气流的情况下散热功率为

$$\rho'_k = \frac{\pi}{4} v' d^2 \int_{T_0}^{T_c} c dT \quad (22)$$

式中： d 为电弧直径； v' 为气流运动速度； T_c 为电弧平均温度； T_0 为电弧初始温度； c 为电弧热容系数。

$$c = \frac{k_1}{T} = \frac{0.41}{T} \quad (23)$$

将式(23)代入式(22)中，可得：

$$\int_{T_0}^{T_c} c dT = \int_{T_0}^{T_c} \frac{k_1}{T} dT = k_1 \ln \frac{T_c}{T_0} \quad (24)$$

$$p'_k = \frac{\pi}{4} v d^2 \times 0.41 \times \ln \frac{T_c}{T_0} = 0.322 d^2 v \ln \frac{T_c}{T_0} \quad (25)$$

分析式(25)可知：气流速度与电弧对流散热成正比，与电弧温度、直径呈反比。即提高气流速度，能加速电弧熄灭，提高灭弧效率和缩短灭弧时间。而提高腔室内气流速度可以通过改变反冲管直径、灭弧腔室数量和直径、装置内部拐点角度、灭弧腔室空间排列等方式实现。

4 工频电流灭弧试验

4.1 试验方案

为了研究反冲多间隙结构灭弧装置的熄弧效果以及观察在 4 片绝缘伞裙下装置能否将电弧运动路径控制在其内部，搭建了工频电流试验回路，如图 4 所示。工频电流灭弧试验是模拟雷击闪络后装置熄弧试验的试验，用于检验装置灭弧性能和耐受电弧灼烧能力^[16]。图 4 中： G 为工频电源； TT 为试验变压器； SS 为可控硅； R_p 为试验回路保护电阻； SG 为放电球隙； L 为电感； C 为电容； R 为电阻； TO 为试品； CT 为电流互感器； DSO 为数字测波仪。

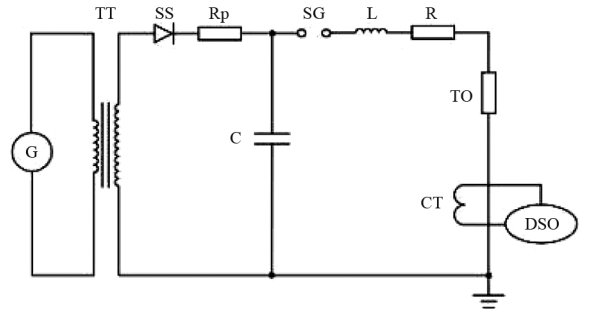


图 4 试验回路

试验主要步骤：1) 搭建试验回路，取下装置上的一片伞裙，依次将 4 片伞裙移动至每层上下处喷口中间，然后将装置接入试验回路。并调整试验回路参数和整定继电保护时间，使试验电源输出满足试验条件要求。同时将高速摄像机调整好角度并固定。2) 启动电源，逐渐升高电压，向装置施加幅值为 2 kA 的工频电流，不断减小放电球隙间距直至放电；3) 当间隙击穿形成工频电弧，装置迅速熄灭电弧时，用高速摄像机记录下电弧从反冲管和灭弧腔室内喷出直至完全熄灭的过程。

4.2 试验结果及分析

图 5 为所测得的工频电流波形图。从图中可以看出，反冲多间隙结构灭弧装置仅在 4 ms 内将幅值为 2 kA 的工频电流完全熄灭，并且经检测电弧并未发生重燃。

图 6 为高速摄像机所记录下的装置熄灭电弧全过程。从图 6(a) 中看出放电间隙被击穿后，电弧并未沿绝缘伞裙闪络，而是被导弧电极诱导进入反冲管内，说明在 4 片绝缘伞裙下电弧也能够沿放电路径进入装置内部。同时首次进入反冲管内的电弧经

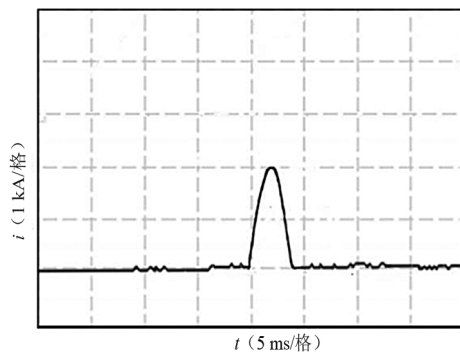


图 5 工频电流波形

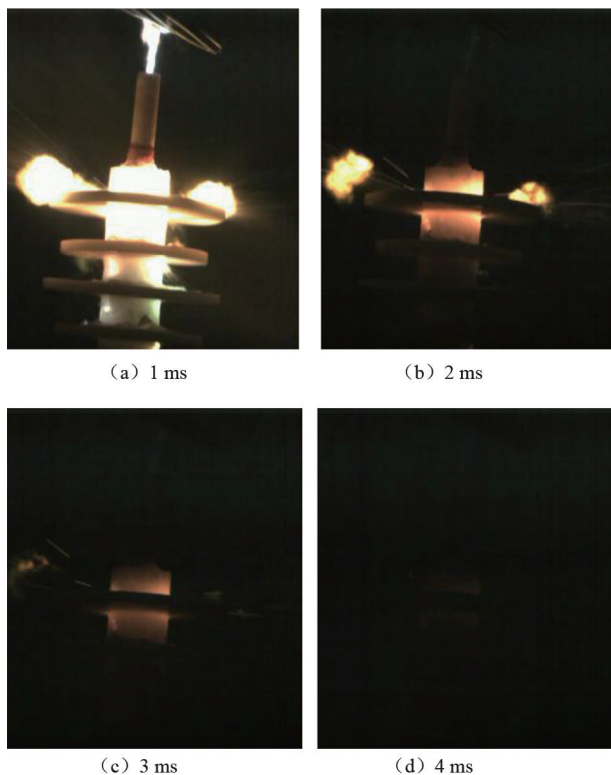


图 6 装置熄灭电弧过程

壁面反射后形成高速、高密、高压的反射电弧,但是此时初始反射电弧能量并不强,对后续电弧阻断效果不明显(需后续电弧不断经壁面反射后,积累足够强的反射能量才能有效阻止源源不断的电弧注入),只携带少量电弧喷出反冲管外。同时在压缩强气流纵吹作用下,大量电弧从第一片伞裙上方的两个喷口处喷出,电弧能量被大幅度削弱。从图 6(b)中看出,随着反冲管内的反射电弧有效阻断后续电弧并携带大量电弧喷出后,反冲管内的电弧已经完全湮灭。而由于没有后续电弧能量的持续注入,灭弧腔室内的电弧电流也逐渐减小,电弧亮度逐渐减弱,并且大量电弧被气流逐渐喷射出腔室外。从图 6(c)中看出,在腔室气流持续作用于电弧下,腔室

内只剩下残余带电粒子,已经不能维持电弧的正常燃烧。从图 6(d)中可以看出,电弧能量完全衰减完毕,电弧未出现重燃迹象。所记录的灭弧全过程验证了反冲多间隙结构灭弧装置具有优良的灭弧效果。

5 结 论

上面主要对反冲多间隙结构装置进行了理论模型研究和试验验证,得出以下结论:

1) 入射电弧经壁面反射后,反射电弧能达到入射电弧压力的 8 倍、密度的 21 倍,高压高密反射会对后续电弧造成剧烈的破坏;同时腔室内气流受电弧高温急剧膨胀产生纵吹气流加速电弧熄灭。

2) 气流速度是电弧熄灭快慢的主导因素,提高气流速度可对装置内部结构进行升级改造实现。

3) 通过工频大电流灭弧试验验证了反冲多间隙结构装置灭弧性能优异,能在 4 ms 内熄灭 2 kA 的电弧,并且在 4 片伞裙下也能控制电弧进入装置内部。

反冲多间隙结构装置已经在云南部分地区推广应用,并取得了良好的运行效果。但该装置目前只限制应用于 10 kV 和 35 kV 线路,后期将进一步开展该装置应用于更高电压等级线路的理论研究。

参考文献

- [1] 周志成,马勇,陶风波,等. 雷击地线档距中央的反击性能分析[J]. 江苏电机工程,2012,31(6):11-14.
- [2] 赵淳,陈家宏,王剑,等. 电网雷害风险评估技术研究[J]. 高电压技术,2011,37(12):3012-3021.
- [3] 葛俊,何金良,曾嵘. 输配电线路防雷保护[M]. 北京:清华大学出版社,2013:181-187.
- [4] 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.
- [5] 陈维江,孙昭英,李国富,等. 110 kV 和 220 kV 架空线路并联保护间隙防雷保护研究[J]. 电网技术,2006,30(13):70-75.
- [6] 陈维江,孙昭英,王献丽,等. 35 kV 架空送电线路防雷并用并联间隙研究[J]. 电网技术,2007,31(2):61-65.
- [7] 戴琦,王巨丰,郑传啸,等. 配电网雷击防护压缩效应切分电弧游离特性[J]. 电网技术,2017,41(7):2401-2406.

(下转第 77 页)

与低压线圈内纸筒之间油路的油流量。

4.4 散热器改进

该主变压器增加 2 组散热器,抬高散热器中心高度。在保障该变压器自身绝缘结构完好的基础上,进一步增强主变压器的散热能力。

结构改进后,在环境温度 40 ℃、中压 160 MVA 负载、低压 40 MVA 容性负载的运行工况下,拉板温升值约为 85 K,较改进前降低约 20 K。

5 结 论

上面某 220 kV 主变压器因设计和安装工艺不良,铁芯柱内部油道、铁芯柱与低压线圈内纸筒之间油隙过小,导致油流不畅、散热能力下降,造成主变压器内部中温过热使铁芯、夹件绝缘材质老化,绝缘性能降低甚至失效。通过改进铁芯柱内部油道绝缘结构、铁芯绑扎结构、绝缘件材质,增大进入铁芯内部油道和铁芯与低压线圈内纸筒之间油路的油流量,提高了铁芯散热能力,通过增加两组散热器,提高该主变压器整体散热能力,改进后拉板温升降低 20 K。

在长期的变压器油化监督中发现了这起重大缺陷并及时治理,成功消除了变压器事故隐患,这也为变压器相关缺陷诊断和检修提供了参考。

参考文献

- [1] 罗杨,杨红权,刘彦琴,等.一起主变压器高压绕组损坏事故检测与分析[J].四川电力技术,2021,44(5):59-63.
- [2] 温建,程汉湘.变压器绕组异常发热故障的检查及预防[J].广东输电与变电技术,2007(2):60-63.
- [3] 李惠明.主变压器中性点套管端部发热分析[J].电力安全技术,2022,24(1):54-57.
- [4] 李志军,周淙,邢来,等.一起主变 C 相套管连接结构发热故障的分析[J].变压器,2019,56(2):78-81.
- [5] 王稼轩.变压器故障特征气体拉曼光谱检测反向传播人工神经网络定量方法研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [6] 电力行业电力变压器标准化技术委员会.变压器油中溶解气体分析和判断导则:DL/T 7252—2014[S].北京:中国电力出版社,2015.
- [7] 罗舜.电力变压器套管将军帽发热故障的红外诊断分析[J].变压器,2018,55(1):50-53.
- [8] 全国变压器标准化技术委员会.电力变压器 第 2 部分:液浸式变压器的温升:GB/T 1094.2—2013[S].北京:中国标准出版社,2014.

作者简介:

李馨博(1984),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为电网安全及资源管理。

(收稿日期:2022-08-08)

(上接第 17 页)

- [8] 王巨丰,吴东,李国栋,等.10 kV 多断点灭弧防雷间隙熄弧特性研究及应用[J].高电压技术,2017,43(5):1589-1595.
- [9] 郭婷,周文俊,黄海鲲,等.多间隙灭弧结构熄灭工频电弧的仿真与试验[J].中国电机工程学报,2016,36(10):2853-2861.
- [10] 司马文霞,贾文彬,袁涛,等.多段微孔结构中电弧的磁流体模型及气吹弧性能仿真[J].高电压技术,2016,42(11):3376-3382.
- [11] PODPORKIN G V, ENKIN E Y, KALAKUTSKY E S, et al. Overhead lines lightning protection by multi-chamber arresters and insulator-arresters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 214-221.
- [12] 熊佳明,李黎,戴宏宇,等.基于爆炸波及能量平衡理论的大电流冲击电弧的冲击波超压作用分析[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6746-6753.

- [13] TAYLOR G. The formation of a blast wave by a very intense explosion. II. The atomic explosion of 1945 [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1950, 201(1065): 175-186.
- [14] 张宝坪,张庆明,黄风雷.爆轰物理学[M].北京:兵器工业出版社,2001.
- [15] 罗兴柏,张玉令,丁玉奎.爆炸力学理论[M].北京:国防工业出版社,2016.
- [16] 电力行业过电压与绝缘配合标准化技术委员会.配电网架空绝缘线路雷击断线防护导则:DL/T 1292—2013[S].北京:中国电力出版社,2014.

作者简介:

唐佳雄(1997),男,硕士,主要研究方向为输配电网防雷接地。

(收稿日期:2022-09-25)