

# 基于MHD的改进型保护间隙快速熄弧仿真

胡新宇<sup>1</sup>, 杨廷方<sup>1</sup>, 汪新秀<sup>2</sup>, 宋华伟<sup>3</sup>, 石发科<sup>1</sup>

1. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114;
2. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007;
3. 国网湖南省电力有限公司检修公司, 湖南 长沙 410004)

**摘要:**保护间隙用于防雷保护,虽然结构简单,但其空气间隙往往无法快速将电弧熄灭,进而导致线路的跳闸率升高。针对此问题,提出了在保护间隙旁加装一个拉弧线圈的方法,通过改变间隙的磁场分布,使得电弧所受的电磁力增加,电弧半径变小,从而加快电弧的熄灭。基于COMSOL仿真平台,根据磁流体力学(MHD)理论建立了间隙电弧放电仿真模型。仿真结果表明,改进型保护间隙的电弧偏移量远大于传统保护间隙,电弧最小半径为传统保护间隙的47%。现场实验证明,改进型保护间隙的电弧均能够在5 ms内被熄灭,远小于传统保护间隙熄弧时间,最大只有传统保护间隙熄弧时间的14.1%。

**关键词:**保护间隙;有限元分析;磁流体力学;电弧仿真;电弧偏移

**中图分类号:**TM 501<sup>+.2</sup>

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202202028

## 0 引言

输电线路分布广泛,易遭受雷击,会产生雷电过电压,并会引起绝缘子串闪络烧毁、架空绝缘导线断线等事故<sup>[1-2]</sup>。而保护间隙可以先于绝缘子串放电,引导雷电流入地,从而保护绝缘子和线路不被烧毁<sup>[3-5]</sup>。因此保护间隙常被广泛应用于线路防雷。但保护间隙也存在一定的缺陷。保护间隙通常为空气间隙,若间隙的电弧电流过大,电弧将难以自行熄灭,这样会使线路的跳闸率上升<sup>[6-8]</sup>。但是当间隙电弧被拉长,并变得更细时,则电弧能够被较快熄灭。

目前国内外对于保护间隙的熄弧问题具有一定程度的研究。文献[9]通过对空气电弧的二维数值仿真,发现了电极磁力能够使电极间的空气电弧发生快速位移,其位移速度可达30 m/s。文献[10]建立了链式电弧模型,研究表明电磁力在电弧的运动过程中起主导作用,电磁力越大,电弧运动速度越快。但文献[11]指出,当绝缘子附近发生闪络时,由于磁场力较小,并不能保证电弧始终向外扩散。再者链式电弧模型虽然能对电弧的运动情况进行很好的模拟仿真,但无法反映出电弧温度、半径等状态的变化。而文献[12-13]均采用了磁流体力学(MHD)模型分别对间隙电弧及负荷开关的旋转电弧进行动态仿真,其电弧的动态特性仿真与实验结果都具有较好的拟合特性。

本文在此基础上,为了能够使保护间隙的电弧快速熄灭,提出了一种改进型保护间隙快速熄弧方

法。该方法将保护间隙与电感线圈串联,利用磁吹电弧的原理,使间隙电弧被拉伸变细,从而实现快速熄弧的目的。当保护间隙动作时,电感线圈增强了间隙间的磁场,使得电弧受到的电磁力增大,迅速向外扩散,从而被拉伸变细,容易熄灭。本文利用COMSOL仿真平台,建立了基于MHD理论的电弧动态仿真模型,对线圈快速熄灭电弧的过程进行了仿真。同时也在现场进行了保护间隙的雷击过电压测试。

## 1 保护间隙电弧的受力分析

保护间隙被击穿后,电流流过拉弧线圈产生磁场,其方向如图1所示。线圈产生的磁场可由Biot-Savart定律,通过积分计算得到,如式(1)所示。

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_G \frac{Idl \times r}{r^3} \quad (1)$$

式中: $B$ 为磁场; $Idl$ 为电流元, $I$ 为雷电流瞬时值,单位为kA; $G$ 为间隙电弧; $r$ 为所求磁场处与电流元的距离; $\mu_0$ 为真空磁导率, $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^2$ 。

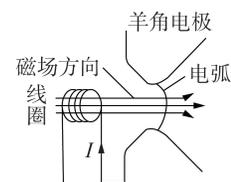


图1 拉弧线圈工作原理

Fig.1 Operation principle of arc drawing of coil

## 2 电弧仿真模型

基于MHD原理,在COMSOL仿真平台中将层流、流体传热、电流和磁场4个物理场耦合,建立电弧仿真模型,进行电弧的动态仿真。该模型由质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、气体状态

收稿日期:2021-07-20;修回日期:2021-12-30

在线出版日期:2022-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777015)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777015)

方程等组成<sup>[14]</sup>。

质量守恒方程如式(2)所示,其形式与流体动力学的质量守恒方程相似。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为气体密度; $\mathbf{V}$ 为速度场矢量; $t$ 为时间。

动量守恒方程如式(3)所示,其本质上表示流体微元的惯性力与体积力和表面张力之间的平衡关系。

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\nabla \mathbf{V}) \mathbf{V} \right] = \rho \mathbf{F}_f - \nabla p + \nabla(\lambda_f \nabla \mathbf{V}) + \nabla(2\mu_f \mathbf{S}) + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{F}_f$ 为体积力的体密度; $p$ 为压力; $\lambda_f, \mu_f$ 为流体的膨胀粘性系数; $\mathbf{S}$ 为变形速率张量; $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 为电磁力。

能量守恒方程如式(4)所示。

$$\rho \frac{d\varepsilon_f}{dt} = -\rho \nabla \mathbf{V} \cdot \Phi + \mu_f' (\nabla \mathbf{V})^2 + \lambda_f \nabla^2 T + \frac{\mathbf{J}^2}{\sigma} \quad (4)$$

式中: $\mu_f'$ 为流体的膨胀粘性系数; $\varepsilon_f$ 为介质的内能; $\Phi$ 为耗散函数; $T$ 为温度; $\sigma$ 为电导率,是关于温度 $T$ 的函数,并非定值; $\mathbf{J}$ 为电流密度; $\lambda_f$ 为热传导系数。

电弧气体的材料参数、电流密度 $\mathbf{J}$ 、电场 $\mathbf{E}$ 以及磁场 $\mathbf{B}$ 的分布情况,可通过其对应的耦合方程(气体状态方程、电流守恒方程)代入MHD控制方程中进行数值求解。气体状态方程和电流守恒方程分别如式(5)、(6)所示。

$$p = \rho \frac{R_0}{M} T \quad (5)$$

$$\nabla(\sigma \nabla \varphi) = 0 \quad (6)$$

式中: $R_0$ 为克分子常数; $M$ 为气体分子量; $\varphi$ 为电势。通过欧姆定律,可推导出电流密度的分布<sup>[15]</sup>,即:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

电、磁场分别表示为:

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为磁位移矢量。

### 3 改进型保护间隙的仿真模型

为研究改进型保护间隙的灭弧能力,根据MHD原理,对其进行建模仿真,其结构图见附录A图A1。对MHD模型进行建模求解时,需要构建复杂庞大的模型数值矩阵进行计算<sup>[16-17]</sup>。其中拉弧线圈使用线圈组来建模,使相同的电流流过每匝线圈(多匝线圈以串联方式连接)的每个圆形域。线圈在COMSOL仿真平台中采用显式建模,应用体网格划分法,其部分剖分网格后的模型见附录A图A2。图中,“1”为线圈组的两部分,在线圈仿真模型中,仅需设置线圈轴向剖面的两部分截面即可代替线圈,且将上截面的电流方向设置成与下截面的电流方向相反即可,设线圈组为均匀多匝,初始匝数为5匝,线圈初始半

径为160 mm;“2”、“3”为保护间隙的电极,电极与线圈在仿真中可通过外部电路联立组成电路;“4”为空气域。

DL/T 1293—2013中指出,复合绝缘子并联间隙的间隙距离应在 $(0.8h, 0.9h)$ ( $h$ 为绝缘子高度)范围内<sup>[18]</sup>。采用型号为FXBW6-10/70的复合绝缘子,其高度为230 mm,故保护间隙距离设置为200 mm。

在COMSOL仿真平台中,磁场采用的是磁矢量计算,对于动量方程中的电磁力,需要在层流场下添加一个体积力,以此让层流场与磁场耦合。该体积力的表达式为:

$$\begin{cases} F_x = B_{zmf} \times J_{ymf} - B_{ymf} \times J_{zmf} \\ F_y = -B_{zmf} \times J_{xmf} + B_{xmf} \times J_{zmf} \\ F_z = B_{ymf} \times J_{xmf} - B_{xmf} \times J_{ymf} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $F_\alpha$ ( $\alpha=x, y, z$ )为电磁力在直角坐标轴下的分量。

当进行雷电流对间隙击穿仿真实验时,下电极由外部电路连接线圈后接地,上电极作为雷电流的输入极,雷电流大小用双指数函数表示,如式(11)所示。

$$I = I_m (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) \quad (11)$$

式中: $I_m$ 为雷电流幅值, $I_m=30$  kA; $k_1, k_2$ 为时间常数, $k_1=1.4 \times 10^4$  s<sup>-1</sup>, $k_2=6 \times 10^6$  s<sup>-1</sup>。在仿真计算过程中,空气域的初始温度为300 K,初始压强为0.1 MPa,初始速度为0。电弧的产生与空气被击穿有关,因此空气的电气物理属性参数值的设置尤为重要。其中空气的相对介电常数及相对磁导率设为1,比热率设为1.4。图2为空气的导热系数 $G'$ 、电导率 $\sigma$ 与温度 $T$ 的关系曲线<sup>[19]</sup>。

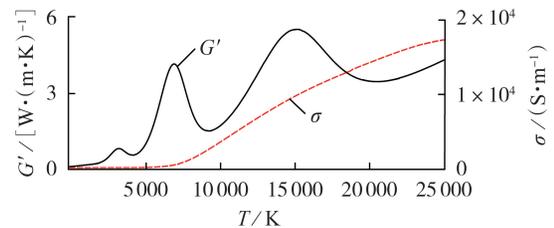


图2 空气电导率、导热系数与温度的关系

Fig.2 Relationship between electrical conductivity and thermal conductivity vs. temperature

## 4 仿真结果及分析

### 4.1 雷电流击穿间隙仿真

根据本文所设置的边界条件和模型,采用COMSOL仿真平台的瞬态求解法进行了雷电流击穿间隙的动态电弧仿真,求解总时长为20 μs,时间步长为0.1 μs。初始阶段电极处的电流迅速升高,保护间隙两端形成不均匀电场,使间隙的空气开始游

离。当间隙的电压超过空气的绝缘强度时,空气被击穿( $t=14\ \mu\text{s}$ )。间隙被击穿后形成通路,转化为导电状态,雷电流通过此通路经接地极入地。

空气间隙被击穿时的电弧温度分布见附录 A 图 A3。由图可知,电弧刚形成时为 1 条细长通道,弧柱区的弧心温度为 9000 K。这是因为空气介质发生电子雪崩和热电离后,产生高温,维持电弧的稳定燃烧。由于电弧的阴极区域及阳极区域有大量高速运动的空间电荷,电子与分子间的碰撞更为频繁,这使得两极区域温度更高,达到 12000 K。空气间隙由于温度高,带电粒子活跃,故其电导率也随之增加。空气间隙被击穿时( $t=14\ \mu\text{s}$ )的电弧电流密度分布见附录 A 图 A4。电流密度越大,意味着电导率越高。由图可知,弧心中的电流密度高达  $8\times 10^7\ \text{A}/\text{m}^2$ ,而在弧心外电流密度会迅速降低。

图 3、4 分别为间隙电弧电流密度及温度在  $x$  轴方向(羊角电极的开口方向)及  $y$  轴方向(与  $x$  轴垂直方向)分布图。由图 3 可知,电流密度的峰值及温度的最高点均出现在弧心区。由图 4 可知,阴极区及阳极区的电流密度和温度均高于弧柱区。

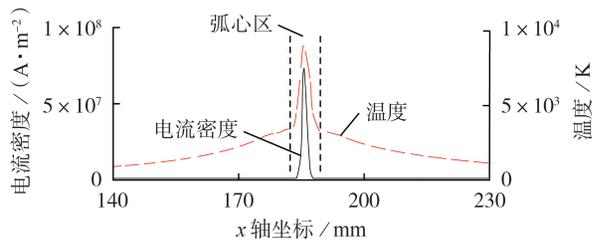


图 3 间隙电弧电流密度及温度在  $x$  轴方向分布

Fig.3 Distribution of current density and temperature of gap arc in  $x$ -axis direction

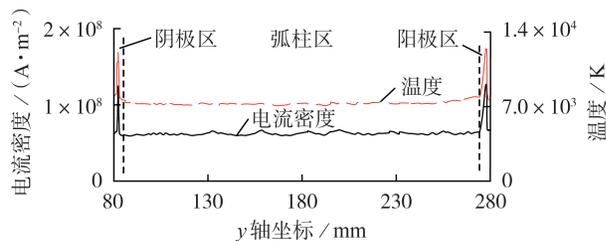


图 4 间隙电弧电流密度及温度在  $y$  轴方向分布

Fig.4 Distribution of current density and temperature of gap arc in  $y$ -axis direction

#### 4.2 改进型保护间隙的电磁力分析

在相同大小的雷电流作用下,改进型保护间隙与传统保护间隙的磁场分布以及电弧在保护间隙中的受力情况不同。经 COMSOL 仿真平台,在保护间隙击穿时,传统保护间隙和改进型保护间隙的磁场分布见附录 A 图 A5。由图可知,当雷电流流过保护间隙时,传统保护间隙在  $z$  轴的磁通密度较小,其值在  $(-0.0174, 0.0154)\ \text{T}$  之间,而改进型保护间隙在  $z$

轴方向的磁通密度较大,其值在  $(-0.158, -0.126)\ \text{T}$  之间,其值是传统保护间隙磁通密度的 8~9 倍。由于流过保护间隙间的雷电流大小相同,2 种间隙电弧的电流密度相等。由式 (10) 可知,电弧所受电磁力与本身的电流密度和穿过的磁通密度的乘积有关。因此改进型保护间隙电弧在  $x$  轴方向所受的电磁力为传统保护间隙的 8~9 倍。

传统保护间隙和改进型保护间隙的电弧所受电磁力的分布分别如图 5、6 所示,图中箭头为电磁力。由图 5 可知,雷电流在通过传统保护间隙时,所受到电磁力方向都由外侧指向中心区域。间隙电弧左右两侧的电磁力大小相差不多,方向相反,互相抵消。因此无法使电弧在水平方向产生较为明显的位移,即此时的电磁力无法对电弧电流形成一个明显的拉弧现象。由图 6 可知,改进型保护间隙电极间电弧左右两侧的电磁力方向为同一方向。综合电弧所受电磁力的大小及方向,改进型保护间隙能够使电弧在电磁力的作用下被迅速拉长,从而达到更快熄弧的目的。

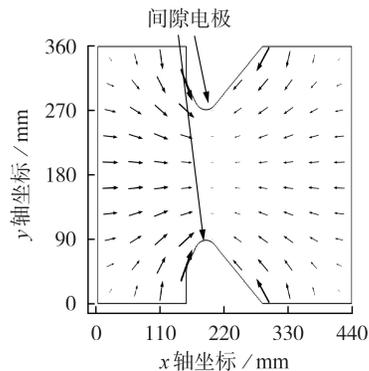


图 5 传统保护间隙击穿时电弧所受电磁力的分布

Fig.5 Distribution of electromagnetic force on arc during traditional protective gap breakdown

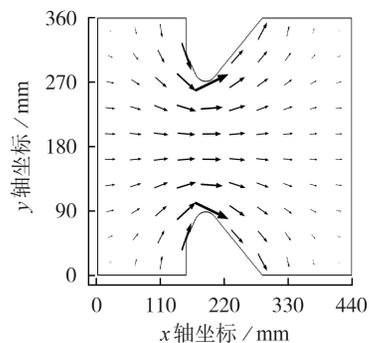


图 6 改进型保护间隙击穿时电弧所受电磁力的分布

Fig.6 Distribution of electromagnetic force on arc during improved protective gap breakdown

#### 4.3 改进型保护间隙的电弧偏移变化

为了比较改进型保护间隙与传统保护间隙对电弧偏移的影响,将冲击雷电流调整为 5 kA 直流,其

他条件不变,通过仿真计算出2种保护间隙电弧的形状及分布情况,结果见附录A图A6。为便于描述电弧受电磁力影响的偏移程度,引入电弧偏移量 $L$ 及电弧最小半径 $d$ ,电弧偏移量 $L$ 表示某一时刻电弧离开初始位置的最大距离, $d$ 表示电弧最细部位的电弧半径。由图A6可知:改进型保护间隙与传统保护间隙的电弧在水平方向上均向右偏移,传统保护间隙的电弧偏移程度较小, $L=15.3\text{ mm}$ , $d=20.1\text{ mm}$ ;改进型保护间隙的电弧偏移程度较大, $L=49.7\text{ mm}$ , $d=9.4\text{ mm}$ 。经计算改进型保护间隙的电弧偏移量为传统保护间隙电弧偏移量的3.24倍,而电弧最小半径为传统保护间隙的47%。对于同样的电弧,若偏移量越大则电弧越细。而电弧越细长,则越容易熄灭。因此改进型保护间隙的熄弧效果要优于传统的保护间隙。

#### 4.4 线圈半径对线圈增强磁场效果的影响

由于线圈用于给保护间隙提供磁场,只需保证保护间隙中通过磁通量最大即可。以线圈匝数及加载电流一定为约束条件,通过仿真计算出了线圈半径对电极保护间隙磁场的影响关系,如图7所示。由图可知:磁通量先随线圈半径的增大而增大,在半径为160 mm时出现最大值;当线圈半径大于160 mm后,保护间隙磁通量反而随着半径的增大而减小。这是因为,线圈半径较小时,线圈会在保护间隙之间产生2种方向相反的磁通(保护间隙中心区域与保护间隙外围区域的磁通方向相反),这样会产生磁通抵消,使得总磁通量较小。随着线圈半径逐渐增大,通过保护间隙之间的磁通逐渐变为同向,此时磁通量有所增加。但当线圈半径不断增大时,线圈产生的磁力线会逐渐变得稀疏,磁通密度降低。由于保护间隙间的距离固定,保护间隙能够收到磁感线的有效面积也是定值。因此保护间隙间的磁通量反而会逐渐减小。因此,对于距离为200 mm的保护间隙,采用半径为160 mm的线圈能够使电弧受到更大的电磁力。

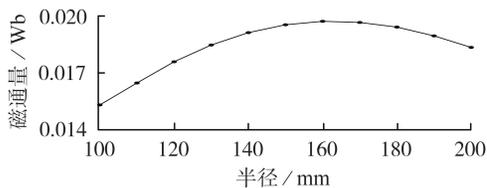


图7 保护间隙间磁通量随线圈半径的变化

Fig.7 Change of magnetic flux between protective gap along with coil radius

#### 4.5 线圈电感对间隙电弧的影响

经仿真计算得到间隙电弧偏移量与线圈电感量及电弧电流大小变化的关系,结果见附录A图A7。由图可知,当电感量一定时,电弧的偏移量随着电流增加而增加。而当电流一定时,电弧的偏移量随着

线圈电感增大而增大,但增加的幅度逐渐降低。这是因为间隙电弧所受电磁力与线圈产生的磁场大小有关,而磁场大小又与线圈的电感有关。为达到快速熄弧的目的,保护间隙间的磁场应尽可能大。

电极间电弧的粗细采用中心处的电弧半径来表示。经仿真计算,间隙电弧半径与线圈电感量及电弧电流的关系见附录A图A8所示。由图可知,间隙电弧半径随着线圈电感量的增加而降低。当线圈电感量一定时,间隙电弧半径会随电流增大而增加。

表1为不同线圈电感以及不同电弧电流情况下,改进型保护间隙电弧半径与对应的传统保护间隙电弧半径比值 $\xi$ 的仿真结果。由于改进型保护间隙电弧半径要小于传统保护间隙电弧半径,所以 $\xi$ 通常小于1。结果表明,当电弧电流相同时,线圈电感越大,电弧半径比值越小,这样越有利于熄弧。而线圈电感一定时,电弧电流越大,电弧半径比值越大,越接近1。即电弧电流越大时,2种间隙的电弧半径差距越小。由此可见,在一定范围的电弧电流下,改进型保护间隙可以起到很好的快速熄弧效果。但当电流太大时,改进型保护间隙的电弧半径也会变得更大,不利于熄弧。经计算当电弧电流小于4 kA时,距离为200 mm的改进型保护间隙可使电弧变得更细,起到快速熄弧的效果。

表1 改进型保护间隙与传统保护间隙的电弧半径比值

Table 1 Ratio of arc radius between improved protective gap and traditional protective gap

电弧电流 / kA	$\xi$				
	0.08 mH	0.16 mH	0.24 mH	0.32 mH	0.40 mH
2	0.70	0.51	0.40	0.33	0.28
4	0.71	0.58	0.50	0.45	0.42
6	0.72	0.60	0.53	0.49	0.47
8	0.72	0.61	0.53	0.50	0.49
10	0.73	0.63	0.57	0.54	0.52

## 5 现场实验

为验证仿真的正确性,进行雷电冲击过电压实验,实验接线图见附录A图A9,现场实验装置见附录A图A10。实验结果见表2,表中, $\varepsilon=T_1/T_2 \times 100\%$ , $T_1$ 、 $T_2$ 分别为采用改进型保护间隙、传统保护间隙的熄弧时间。结果表明,改进型保护间隙的电弧均能够在5 ms左右内被熄灭,远小于传统保护间隙熄弧

表2 雷击过电压实验结果

Table 2 Lightning overvoltage test results

序号	熄弧时间 / ms		$\varepsilon / \%$
	改进型保护间隙	传统保护间隙	
1	5.3	37.5	14.1
2	5.0	38.6	13.0
3	5.5	41.3	13.3
4	5.1	38.2	13.4
5	4.9	38.9	12.6

时间,最大只有传统保护间隙熄弧时间的14.1%。目前多数继电保护装置最快动作时间在20 ms左右。因此改进型保护间隙可以大幅降低线路的跳闸率,减少了停电损失。

## 6 结论

本文设计了一种改进型保护间隙,提出在保护间隙旁加装一个拉弧线圈,使得间隙电弧所受的电磁力增加,减小电弧半径,从而加快电弧的熄灭。在仿真系统里搭建了改进型保护间隙的电弧放电仿真模型。现场实验证明了改进型保护间隙的可行性和有效性。所得结论如下:

1)改进型保护间隙在 $z$ 轴方向的磁通密度较大,其值是传统保护间隙磁通密度的8~9倍,能够提供更大的电磁力,利于电弧的快速熄灭;

2)线圈半径能够影响线圈增强磁场的效果,对于距离为200 mm的保护间隙,线圈半径为160 mm时磁场增强效果最大;

3)经计算改进型保护间隙的电弧偏移量为传统保护间隙电弧偏移量的3.24倍,而电弧最小半径为传统保护间隙的47%,对于同样的电弧,若偏移量越大则电弧越细,而电弧越细长,则越容易熄灭,因此改进型保护间隙的熄弧效果要优于传统的保护间隙;

4)实验结果表明,该改进型保护间隙的电弧的熄灭时间远小于传统保护间隙熄弧时间,最大只有传统保护间隙熄弧时间的14.1%,这也证明了该改进型保护间隙熄弧的有效性和可靠性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 何金良,曾嵘. 清华大学学术专著:配电网雷电防护[M]. 北京:清华大学出版社,2013:25-27.
- [2] 陈维江,孙昭英,李国富,等. 110 kV和220 kV架空线路并联间隙防雷保护研究[J]. 电网技术,2006,30(13):70-75.  
CHEN Weijiang, SUN Zhaoying, LI Guofu, et al. Development of parallel gap lightning protection device for 110 kV and 220 kV overhead lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(13):70-75.
- [3] 王巨丰,吴东,李国栋. 10 kV多断点灭弧防雷电间隙熄弧特性研究及应用[J]. 高电压技术,2017,43(5):1589-1595.  
WANG Jufeng, WU Dong, LI Guodong. Arc-extinguishing characteristics research and application of 10 kV multiple-break arc-extinguishing lightning protection gap[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5):1589-1595.
- [4] 司马文霞,张智,杨庆,等. 110 kV复合绝缘子棒形并联间隙工频电弧疏导过程的试验研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):114-121,226.  
SIMA Wenxia, ZHANG Zhi, YANG Qing, et al. Experimental research on power frequency arc movement process of 110 kV composite insulators in rod shape parallel gap lightning protection devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31):114-121,226.

- [5] 陆佳政,谢鹏康,方针,等. 重覆冰条件下防冰防雷绝缘子电场仿真与伞裙优化[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):199-204.  
LU Jiazheng, XIE Pengkang, FANG Zhen, et al. Electric field simulation and sheds optimization of anti-icing and anti-lightning insulator under heavy icing condition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3):199-204.
- [6] 陈维江,孙昭英,王献丽,等. 35 kV架空送电线路防雷用并联间隙研究[J]. 电网技术,2007,31(2):61-65.  
CHEN Weijiang, SUN Zhaoying, WANG Xianli, et al. Study on shunt gap lightning protection for 35 kV overhead transmission lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(2):61-65.
- [7] 王硕,周鑫,闫坤,等. 基于压缩温升-定向气吹的压缩灭弧防雷电间隙机理研究[J]. 电瓷避雷器,2020(4):29-34,40.  
WANG Shuo, ZHOU Xin, YAN Shen, et al. Study on mechanism of compression arc extinguishing lightning protection based on compression-temperature-rising and directional air blowing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(4):29-34,40.
- [8] 于哲吾,周浩. 铁塔横担侧向避雷针针对高压交流线路的绕击保护效果分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):47-52.  
YU Jingzhe, ZHOU Hao. Shielding-failure protective effect of sideward rod on tower crossarm of UHVAC transmission line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7):47-52.
- [9] RACHARD H, CHÉVRIER P, HENRY D, et al. Numerical study of coupled electromagnetic and aerothermodynamic phenomena in a circuit breaker electric arc[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(9):1723-1734.
- [10] 司马文霞,谭威,杨庆,等. 基于热浮力-磁场力结合的并联间隙电弧运动模型[J]. 中国电机工程学报,2011,31(19):138-145.  
SIMA Wenxia, TAN Wei, YANG Qing, et al. Long AC arc movement model for parallel gap lightning protection device with consideration of thermal buoyancy and magnetic force [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19):138-145.
- [11] 谷山强,何金良,陈维江,等. 架空输电线路并联间隙防雷装置电弧磁场力计算研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(7):140-145.  
GU Shanqiang, HE Jinliang, CHEN Weijiang, et al. Magnetic force computation for the electric arc of parallel gap lightning protection device on overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7):140-145.
- [12] 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灭弧性能仿真[J]. 高电压技术,2016,42(11):3376-3382.  
SIMA Wenxia, JIA Wenbin, YUAN Tao, et al. MHD model of arc in multi-segment microhole structure and simulation of air-blowing arc-quenching performance[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11):3376-3382.
- [13] 祁海洋,袁端磊,王海燕,等. 基于MHD理论的旋转电弧三维动态仿真及分析[J]. 高压电器,2019,55(2):69-76.  
QI Haiyang, YUAN Duanlei, WANG Haiyan, et al. 3D dynamic simulation and analysis of rotary arc based on MHD theory [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2):69-76.
- [14] 向凌峰. 基于磁流体力学模型的稳态真空电弧建模与计算[D]. 武汉:华中科技大学,2019.  
XIANG Lingfeng. Simulation of steady vacuum arc based on magnetohydrodynamic model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [15] 郭蕾,李丽妮,邢立勤,等. 基于电-热场联合分析的EPR中压电缆终端异常热点仿真分析及优化[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):211-224.  
GUO Lei, LI Lini, XING Limeng, et al. Simulation analysis and optimization based on electric-thermal field for abnormal distortion hot spots of EPR medium voltage cable terminal[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7):211-224.

- [16] 魏本刚,吴楠楠,任晓明,等. 基于有限体积法的分体式冷却变压器热学三维仿真技术[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):177-181.  
WEI Bengang,WU Nannan,REN Xiaoming,et al. Three dimensional simulation technology of separated cooling type transformer based on finite volume method[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(2):177-181.
- [17] 田雨,杜志叶,柳双,等. 有限元电场计算时模型表面网格精细控制方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(11):205-210.  
TIAN Yu,DU Zhiye,LIU Shuang,et al. Precise mesh control method on model surface for finite element electric field calculation[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(11):205-210.
- [18] 国家能源局. 交流架空输电线路绝缘子并联间隙使用导则:DL/T 1293—2013[S]. 北京:中国电力出版社,2014.
- [19] GHORU S,HEBERLEIN J V R,PFENDER E. Thermody-

amic and transport properties of two-temperature nitrogen-oxygen plasma[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing,2008,28(4):553-582.

#### 作者简介:



胡新宇

胡新宇(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为高电压与绝缘技术(**E-mail**:862173770@qq.com);

杨廷方(1975—),男,副教授,博士,主要研究方向为电力系统绝缘(**E-mail**:2630544839@qq.com);

汪新秀(1978—),女,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力工程技术管理(**E-mail**:1453353879@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

## Fast arc extinction simulation for improved protective gap based on MHD

HU Xinyu<sup>1</sup>, YANG Tingfang<sup>1</sup>, WANG Xinxiu<sup>2</sup>, SONG Huawei<sup>3</sup>, SHI Fake<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of

Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China;

3. State Grid Hunan Electric Power Maintenance Company, Changsha 410004, China)

**Abstract:** The protective gap is used for lightning protection. Although the structure is simple, the air gap often cannot quickly extinguish the arc, which leads to the higher tripping rate of the transmission line. Aiming at this problem, a method of installing an arc coil next to the protective gap is proposed. By changing the magnetic field distribution of the gap, the electromagnetic force on the arc is increased, and the arc radius is decreased, thereby speeding up the arc extinction. Based on COMSOL platform, a gap arc discharge simulation model according to the theory of MHD (MagnetoHydroDynamics) is established. The simulative results show that the arc offset of the improved protective gap is far greater than that of the traditional protective gap, and the minimum arc radius of the improved protective gap is 47% of that of the traditional protective gap. Field experiment proves that the arc of the improved protective gap can be extinguished within about 5 ms, which is far less than the arc extinction time of the traditional protective gap, and the maximum time is only 14.1% of the arc extinction time of the traditional protective gap.

**Key words:** protective gap; finite element analysis; magnetohydrodynamics; arc simulation; arc offset

附录 A

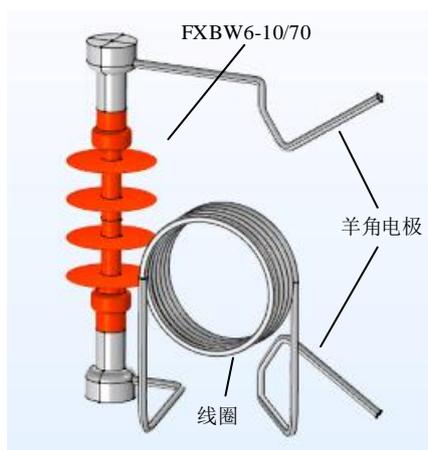
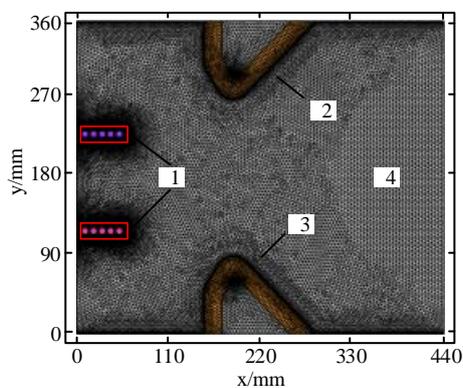


图 A1 改进型保护间隙结构

Fig.A1 Structure of improved protective gap



注：1—线圈组；2、3—羊角电极；4—空气域

图 A2 改进型保护间隙模型

Fig.A2 Model of improved protective gap

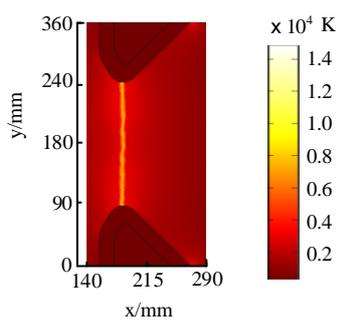


图 A3  $t=14 \mu\text{s}$  间隙电弧温度分布图

Fig.A3 Diagram of gap arc temperature distribution at  $t=14 \mu\text{s}$

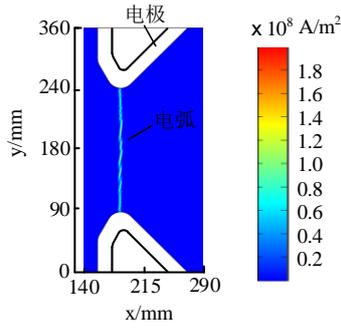


图 A4  $t=14 \mu\text{s}$  时刻间隙电弧电流密度图

Fig.A4 Diagram of gap arc current density distribution at  $t=14 \mu\text{s}$

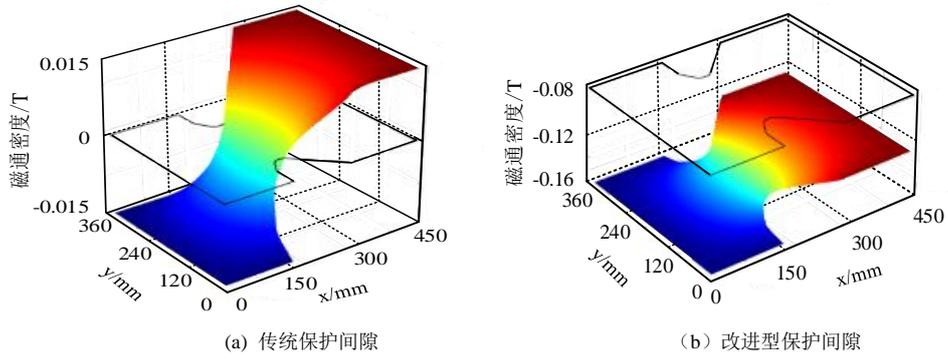


图 A5 传统保护间隙和改进型保护间隙击穿时间隙的磁场分布

Fig.A5 Magnetic field distribution of gap during traditional protective gap and improved protective gap breakdown

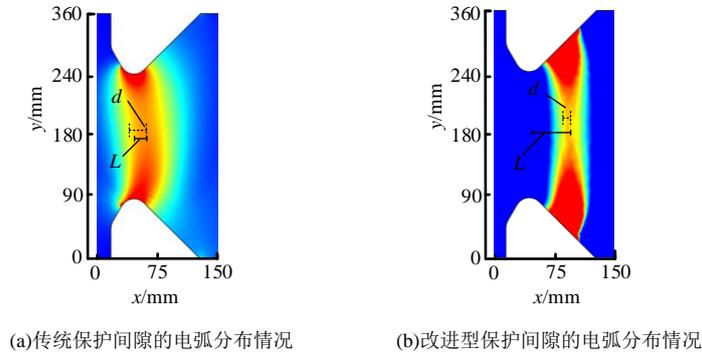


图 A6 2种保护间隙的电弧分布情况

Fig.A6 Arc distribution of two protective gaps

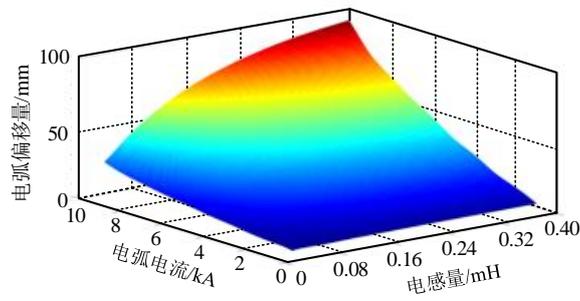


图 A7 电弧偏移量与电弧电流及线圈电感的关系

Fig.A7 Relationship between arc offset and arc current and coil inductance

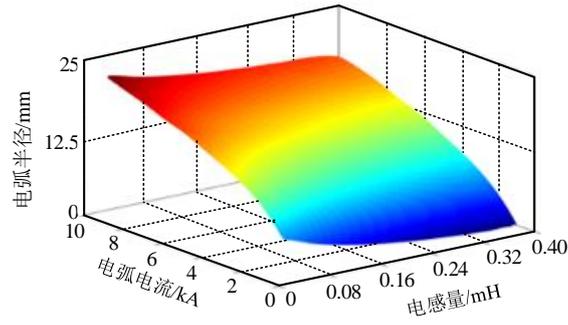
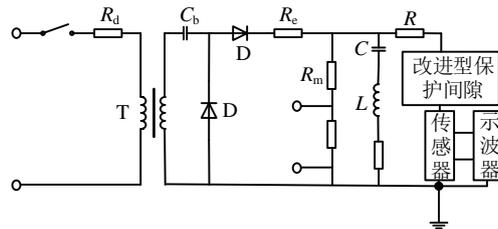


图 A8 电弧半径与电弧电流及线圈电感的关系

Fig.A8 Relationship between arc radius and arc current and coil inductance



注：T—高压试验变压器； $R_d$ —变压器串联电阻； $R_m$ —直流电阻分压器； $C_b$ —倍压回路电容； $R_e$ —充电保护电阻； $R$ —调波电阻；D—整流硅堆；C—主电容器；L—调波电感。

图 A9 实验接线图

Fig.A9 Wiring diagram for experiment

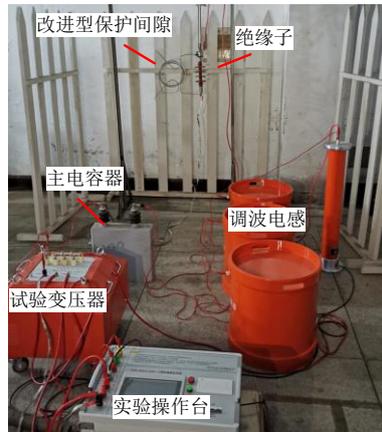


图 A10 现场实验图

Fig.A10 Diagram of field experiment