

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.05.018

雷击过程中避雷线弧根的滑行运动建模与分析

郭德明^{1,2}, 林子铭¹, 刘刚^{1,2}, 王珮泮¹, 彭向阳³, 王锐³

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641;

2. 人工智能与数字经济广东省实验室(广州), 广东 广州 510335;

3. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 避雷线(overhead ground wire, OGW)是防止输电导线遭受雷击的重要设备。当 OGW 遭受雷击时, 弧根的滑行运动会导致不一样的损伤机理, 因此有必要对弧根的滑行运动进行分析, 从而为损伤机理的研究和避雷线的选型设计提供滑行位移的数据支持。首先, 文中基于链式建模方法建立了弧根沿着 OGW 的滑行运动模型, 并通过分析电磁力的主要影响范围, 缩小了建模的空间边界, 从而大幅度减少了计算量; 然后, 通过实验室内的针-线放电实验对模型进行了验证; 最后, 基于所建立的模型, 对弧根滑行位移的影响因素, 包括热浮力、回击电流和持续电流, 进行了分析。结果表明, 在回击电流的作用下, 热浮力的影响可以忽略。弧根的滑行位移与波尾时间成正比, 而与波头时间无关。在持续电流的作用下, 热浮力会影响弧根滑行位移的评估结果, 最大误差超过了 25%。

关键词: 雷击; 弧根; 滑行运动; 避雷线(OGW); 链式模型; 回击电流; 持续电流

中图分类号: TM244

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)05-0181-08

0 引言

避雷线(overhead ground wire, OGW)是防止输电线路遭受雷击的重要设备。然而在实际电网中, 雷击有时会对 OGW 的线股造成损伤^[1-2], 同时材料钢暴露于外界环境也易发生腐蚀, 进而导致 OGW 的机械强度以及使用寿命降低, 严重威胁输电网络的安全运行。在实际的雷击过程中, 在热浮力、电磁力等因素的作用下, 雷电弧根会沿着 OGW 滑行运动^[3-4]。相较于弧根位置固定的情况, 弧根的运动容易造成更多线股的损伤, 发生腐蚀的线股数量也会增加, 因此长期运行后 OGW 的机械强度和使用寿命会进一步下降。文献[4]报道了一起多重回击下因弧根运动引起的避雷线断线事故。当考虑弧根滑行运动时, OGW 的损伤机理中存在不一样的特征, 因此有必要对弧根的滑行运动机制开展研究, 这不仅对完善 OGW 的雷击损伤机理具有重要的意义, 也可为避雷线的选型优化提供理论指导。

在一次雷击过程中, 弧根的滑行运动容易受到热浮力、雷电流等众多复杂因素的影响。为了充分了解弧根的滑行运动现象, 首先对滑行运动的影响因素进行分析, 然而目前关于雷击损伤机理的研究均是在假设雷电弧根位置不变的情况下开展^[5-7]。仅少数文献对弧根的滑行运动现象进行报道^[8], 既

缺乏对弧根滑行运动的系统性认知, 也缺少对雷电弧根滑行运动影响因素的分析。

为有效开展研究, 首先对雷电弧根的滑行位移进行准确评估。但自然雷击属于长间隙放电^[9], 经实验模拟雷电弧根的滑行运动相当困难。文献[10-12]指出, 对于绝缘子并联间隙的电弧形态模拟, 通常采用链式模型来实现, 故文中根据已有的链式建模方法^[13-15], 对雷电弧根的滑行运动进行模拟, 并计算其滑行位移。然而现有的链式模型主要适用于短间隙放电, 长短间隙放电模拟的区别主要是: 短间隙放电所建立的链式模型存在明确的空间边界, 计算量相对较小; 而对于自然雷击为代表的长间隙放电, 空气间隙的长度是公里级别的, 必然存在建模和计算量庞大的问题。因此, 在保证计算结果准确和避免过大建模工作量的前提下, 确定自然雷击的建模空间边界是文中亟待解决的问题。

文中首先根据已有的链式建模方法, 对弧根沿着 OGW 的滑行运动进行建模和分析。在建模过程中, 根据 OGW 产生的电磁力影响范围来确定建模的空间边界。然后, 通过实验室内的针-线放电实验对所建立的模型进行验证。最后, 基于模型分别讨论热浮力、回击电流和持续电流对弧根滑行运动的影响。

1 雷电弧根的滑行运动模型

1.1 基于链式模型的雷电弧运动建模

当 OGW 遭受雷击时, 在风、电磁力、热浮力和

收稿日期: 2024-01-11; 修回日期: 2024-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977083); 广东省自然科学基金资助项目(2022A1515011182)

空气阻力等因素的影响下,雷电弧会发生运动。雷电弧可分为雷电弧根和雷电弧柱两部分,其中雷电弧根会沿着 OGW 表面发生滑行运动^[3,16]。由于雷电弧根与 OGW 的雷击损伤密切相关,文中将重点对雷电弧根的滑行运动进行建模分析。但值得注意的是,雷电弧柱的运动会通过电磁力对弧根的滑行运动产生影响^[4],因此在分析滑行运动时,必须对雷电弧整体的运动情况进行建模。然而,电磁力等因素对雷电弧运动的影响不是均匀分布的,因此不能简单地将雷电弧整体看作一个圆柱体。文中将基于链式模型^[17-18],对雷电弧的运动进行建模。

首先,考虑到弧根只沿着 OGW 轴线方向发生滑行运动,文中只对二维平面内的雷电弧运动进行建模,建立二维坐标系,如图 1 所示。由图 1 可知,坐标系的 x 轴与 OGW 的轴线重合,而 d 轴竖直向上。

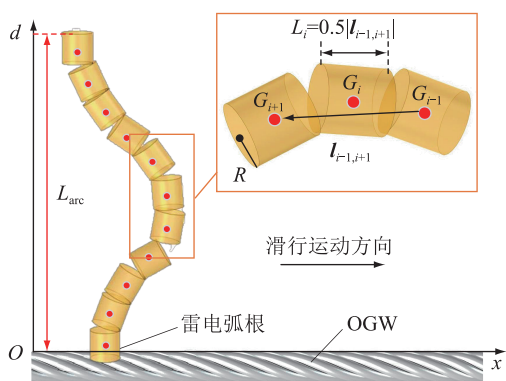


图 1 二维坐标系下的电流微元

Fig.1 Arc elements in the two-dimensional coordinate system

然后,在模型中生成一段长度为 L_{arc} 的竖直雷电弧,作为运动过程的初始状态,并将这段雷电弧平均划分为多个圆柱型的电流微元。由图 1 可知,第 i 个电流微元的长度 L_i 可由式(1)计算得到。

$$L_i = 0.5 |I_{i-1,i+1}| \quad (1)$$

式中: $I_{i-1,i+1}$ 为由 G_{i-1} 指向 G_{i+1} 的向量,代表着第 i 个电流微元的电流方向, G_i 为第 i 个电流微元的重心。

所有电流微元的半径 R 相同,可由式(2)计算得到^[14]。

$$R = k\sqrt{I} \quad (2)$$

式中: k 为半径系数; I 为雷电流,由回击电流 I_{pc} 和紧随其后的持续电流 I_{cc} 组成^[9]。

对于回击电流,通常使用双指数函数进行描述,如式(3)所示。

$$I_{pc} = I_a \left(e^{-t/t_\alpha} - e^{-t/t_\beta} \right) \quad (3)$$

式中: I_a 为回击电流的幅值; t 为时间; t_α 、 t_β 分别为回

击电流的波尾时间和波头时间,其持续时间通常取 $500 \mu s$ 。

而对于持续电流,通常为幅值不超过 $100 A$ 的恒定电流,其持续时间 t_c 通常为 $0 \sim 100 ms$ ^[9]。

由于电流微元的长度足够小,在分析单个电流微元的运动时,可以忽略各因素的不均匀分布特性。同时,在一个足够短的时间步长 Δt 内,可认为各因素对电流微元运动的影响近似不变,即每个电流微元在 Δt 内的速度大小均是一个常数。因此,电流微元在 Δt 内的位移向量 Δx 的计算如式(4)所示。

$$\Delta x = \int_i^{i+\Delta t} v(t) dt = v\Delta t \quad (4)$$

式中: $v(t)$ 为电流微元的速度向量。

文献[18]指出,风会使雷电弧获得一个与实际风速 v_{wind} 相同的初速度,如式(5)所示。

$$v = \Delta v + v_{wind} \quad (5)$$

式中: Δv 为电流微元与空气的相对速度向量。

电流微元在相对运动过程中的受力情况如图 2 所示, d_i 为 G_i 与 OGW 的距离, θ_i 为以 G_i 和雷电弧根为端点的线段与水平线的夹角, m 为分流系数,其取值范围为 $0 \sim 1$ 。根据牛顿第二定律,电流微元与空气的相对二维运动可用式(6)进行描述。

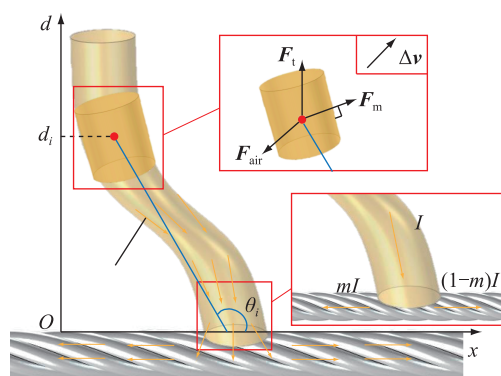


图 2 雷电弧根的受力情况和 OGW 产生的磁感应强度

Fig.2 Forces on the arc root and magnetic induction intensity generated by OGW

$$F_m + F_t + F_{air} = m_{arc} a \quad (6)$$

式中: F_m 、 F_t 、 F_{air} 分别为电磁力向量、热浮力向量和空气阻力向量; m_{arc} 、 a 分别为电流微元的质量和加速度,由于雷电弧的密度远小于空气的密度,可以忽略电流微元的加速过程,即 $m_{arc} a$ 的大小为 0 ^[13]。

F_m 的方向垂直于电流微元的电流方向,而其模 $|F_m|$ 可由式(7)计算得到^[19]。

$$|F_m| = B I L_i \quad (7)$$

式中: B 为磁感应强度大小。

根据安培定律,第 i 个电流微元处的磁感应强度 B_i 由两部分叠加而成。一部分是第 j 个电流微元

产生的磁感应强度 $B_{ji}(j \neq i)$, 另一部分是雷电流通过弧根分流至 OGW 两侧时产生的磁感应强度 B_{si} 。其中, B_{ji} 可由比奥-萨法尔定理直接计算得到^[19]。而 B_{si} 的计算可以分为两种情况: 当电流微元距离 OGW 比较远时, 可以将两股分流电流看作半无限长的水平线电流, 此时根据比奥-萨法尔定理, B_{si} 可由式(8)计算得到; 当电流微元距离 OGW 比较近时, 雷电流在弧根附近的复杂分流情况不可忽略, 此时通过有限元软件 COMSOL, 文中对 B_{si} 进行数值求解。

$$B_{si} = \frac{\mu_0 m I}{4\pi d_i} (1 - \cos \theta_i) - \frac{\mu_0 (1 - m) I}{4\pi d_i} (\cos \theta_i + 1) \quad (8)$$

式中: μ_0 为空气中的磁导率。

F_t 的方向竖直向上, F_{air} 的方向与 Δv 的方向相反。 $|F_t|$ 、 $|F_{air}|$ 可分别由式(9)和式(10)计算得到^[18]。

$$F_t = \rho g \pi R^2 L_i \quad (9)$$

$$|F_{air}| = C_D R L_i \rho |\Delta v|^2 \quad (10)$$

式中: ρ 为空气密度; g 为重力加速度; C_D 为空气阻力系数。上述公式中各参数的取值见表 1。

表 1 模型中的参数

Table 1 Parameters in the model

参数	数值
$K/(m \cdot A^{-0.5})$	0.001 3
$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	1.29
$G/(m \cdot s^{-2})$	9.8
C_D	1
$\mu_0/(H \cdot m^{-1})$	$4\pi \times 10^{-7}$

最后, 联立式(6)一式(10), 即可计算得到 Δv 。进而计算得到各电流微元在 Δt 内的位移 Δx 。值得注意的是, 在发生位移之后, 各电流微元重心之间的距离会发生改变, 这可能导致某些电流微元的位置出现异常, 如图 3 所示。因此, 在每个 Δt 的位移后, 都要对出现异常的电流微元进行相应的处理。当电流微元的长度过长时 ($L_i > 1 \text{ mm}$)^[19], 要将其分解为多个电流微元, 如图 3(a) 所示。当两个电流微元之间的距离过近时, 将会出现重合现象。因此, 须要删除多余的电流微元, 如图 3(b) 所示。当电流微元运动到边界 (比如地面) 外时, 也要将其删除, 如图 3(c) 所示^[19-20]。

1.2 模型中雷电弧长度的确定

在上述链式模型中, 雷电弧的长度就是建模的空间边界, 而自然界中雷电弧长度往往超过 1 km。在如此大的空间尺度上, 链式模型须求解规模巨大

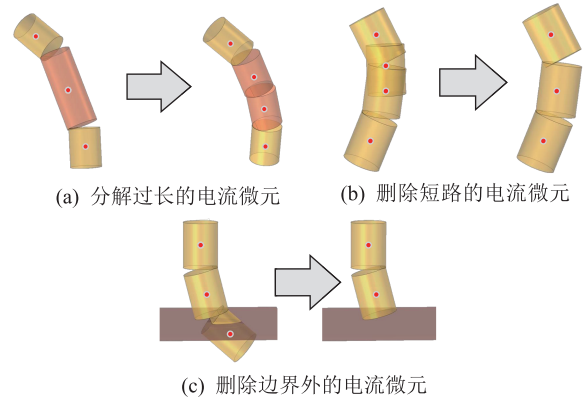


图 3 电流微元的异常情况处理方法

Fig.3 Abnormal situation of arc element and processing method

的电流微元运动方程, 这必然会导致模型的计算时间过长, 因此在保证模型精确性的前提下有必要在模型中确定一个较小的雷电弧长度 L_{arc} 。

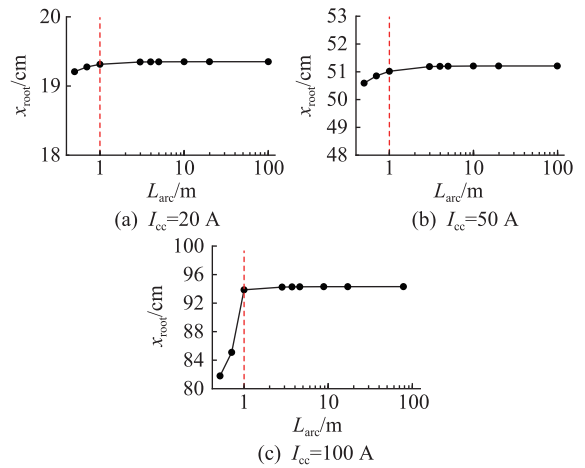


图 4 L_{arc} (对数刻度) 与 x_{root} 的关系 ($I_a = 0, t_c = 1 \text{ s}$)

Fig.4 Relationship between L_{arc} (logarithmic scale) and x_{root} in the situation of $I_a = 0, t_c = 1 \text{ s}$

根据式(8), 随着电流微元与 OGW 距离的增加, 电磁力的影响会越来越小。可以推断, 电流微元与 OGW 的距离存在一个阈值 d_{max} 。当电流微元与 OGW 的距离大于 d_{max} 时, 可以忽略电磁力对电流微元的影响, 进而认为这些电流微元没有发生相对运动。在这种情况下, 电磁力的作用可以忽略, 此时 $L_{arc} = d_{max}$ 。可以推断, L_{arc} 越大, 模型的计算量就越大, 但模型结果也会相对更精确。在不同的持续电流下, L_{arc} 与弧根滑行位移 x_{root} 的关系如图 4 所示。由图 4 可知, 当 $L_{arc} > 1 \text{ m}$ 时, x_{root} 的结果已经趋于稳定。因此, 在文中所建立的模型中, L_{arc} 设置为 4 m。

2 模型的验证

对于第 1 章建立的雷电弧根滑行运动模型, 有

必要对模型的准确性进行验证,然而自然界中的雷电弧的运动数据难以获取。对此,文中考虑通过实验模拟电弧弧根运动,从而收集足够的实验数据以验证模型,但由于空间尺度条件的限制,也无法通过模拟雷电弧的运动来直接验证模型结果^[21-24]。考虑到针-线放电实验中电弧运动的物理模型描述与真实情况中避雷线弧根运动数据是一致的,文中开展了空气间隙为厘米级别的针-线放电实验。由于间隙长度较小,针-线放电实验能够产生稳定且长时间的电弧^[25-28],有利于电弧运动现象的充分观测。下面对针-线放电实验的设计展开具体论述。

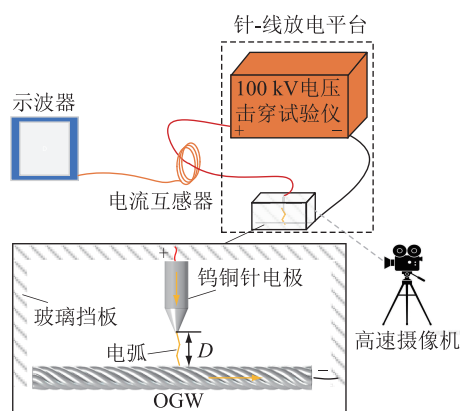


图5 针-线放电实验的实验平台

Fig.5 Experimental platform of the needle-wire discharge experiment

针-线放电实验的实验平台包括产生电弧的针-线放电平台,记录电弧运动的高速摄像机(采样频率为200 Hz),测量电弧电流的电流互感器和示波器,见图5。针-线放电平台主要由钨铜针电极、OGW和100 kV电压击穿实验仪组成,其中100 kV电压击穿实验仪中的变压器容量为10 kV·A。为了保证针电极与OGW之间的空气间隙可以被击穿并产生稳定的电弧,距离 D 设置为3 cm以内。当 D 设置为2 cm时,平均击穿电压为40 kV。OGW的侧面放置一把刻度尺,用于读取弧根的滑行位移数据。为了防止外界不可控的风对电弧的运动产生影响,在平台周围还设置了玻璃挡板。同时,避雷线的一端设置为接地(即分量系数 $m=1$)。

针线放电实验的结果如图6所示。根据示波器的记录,实验中的部分电弧电流波形图如图6(a)所示,电弧电流的变化具有一定的周期性。产生的电弧也是经历“产生-运动-熄灭”的周期性的变化,如图6(b)所示。由于每个周期内电弧的形态有所差异,因此电流波形也是有所不同。由图6(b)可知,电弧在产生之初接近于竖直状态;随后,电弧发生运动;随着电弧的运动,弧柱部分会出现一定程度

的上突;在运动一段时间后,电弧熄灭。对比电弧形态的实验结果和模型结果,可以证明模型输出的电弧形态结果是准确的。进一步地,得到了不同周期内弧根在100 ms内的滑行位移结果,如图6(c)所示。可以看出,与电流的变化类似,每一个周期内弧根的位移变化也是有所不同的。

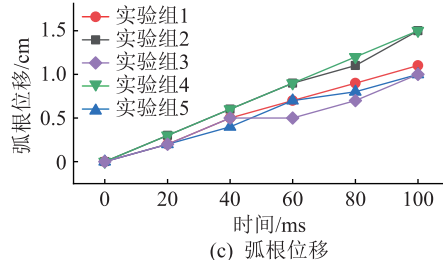
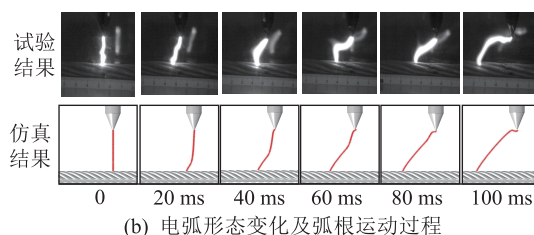
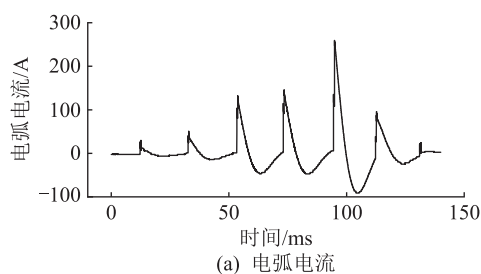


图6 电弧运动情况与仿真结果的对比

Fig.6 Comparison of experimental results and model results of arc movement

从图6的结果可以看出,不同周期内的电流变化和滑行位移变化是不一样的。然而,在实验中同步测量弧根位移和电流的难度很大。因此,在第2章中对于一个周期内的电流和位移进行平均化处理,以便和所建立的模型进行对比。不同距离 D 下的实验结果和模型结果如图7所示。可以看出,弧根的滑行位移随着时间的增加而增大。模型结果与实验结果基本上是一致的,这一结果验证了文中所构建模型的准确性。

3 雷电弧根滑行运动的影响因素分析

根据1.1节,热浮力 F_t 、回击电流 I_{pc} 和持续电流 I_{cc} 均会对雷电弧根的滑行运动产生一定的影响,因此文中基于雷电弧根滑行运动模型将对这些因素的影响进行更进一步的分析。

3.1 热浮力 F_t

在回击电流的作用下,热浮力 F_t 对雷电弧的形

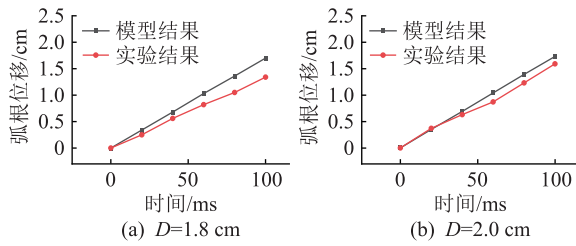


图7 弧根滑行位移的实验结果与模型结果的对比

Fig.7 Comparison of experimental results and model results of arc root sliding displacement

态以及滑行位移的影响如图8(a)所示。由图8(a)可知,回击电流作用下的热浮力影响微弱,这是由于回击电流的持续时间短,热浮力来不及发挥作用。而在持续电流的作用下,热浮力的影响如图8(b)所示。对比图8(a)和图8(b)可知,相比于回击电流,持续电流作用下的热浮力对于弧根滑行位移的影响更为显著,这是由于持续电流的持续时间更长,热浮力的效果更明显。一方面,根据式(6)一式(10),作为合力的一部分,热浮力对弧根滑行运动速度产生了一定的影响;另一方面,热浮力导致了雷电弧的形态变化。雷电弧形态的变化又改变了磁场分布情况,导致弧根所受的电磁力发生改变,进而影响了滑行位移。

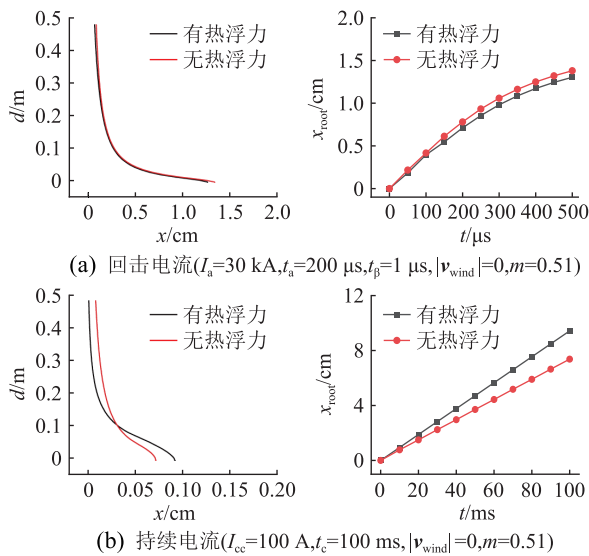


图8 热浮力对弧根滑行运动的影响

Fig.8 Influence of thermal buoyancy F_t on sliding motion of arc root

总之,在持续电流作用下,热浮力会影响弧根滑行位移的评估结果。不考虑热浮力所产生的最大误差可达到28%。而在回击电流的作用下,热浮力的影响可以忽略。

3.2 回击电流 I_{pc}

根据式(3),在回击电流 I_{pc} 的作用下,雷电弧根

的滑行运动特性与回击电流幅值 I_a 、波头时间 t_b 和波尾时间 t_a 有关。基于模型,在不同的 I_a 、 t_a 和 t_b 条件下,雷电弧根位移 x_{root} 随时间 t 的变化情况如图9所示。对比图中黑色、红色、蓝色曲线可知,波头时间 t_b 与弧根的滑行位移 x_{root} 呈正相关,但总体上相关性并不显著。对比图中黑色、绿色、紫色曲线可知,滑行位移与波尾时间 t_a 有着较显著的正相关关系。而对比4个子图可知,回击电流幅值 I_a 对弧根位移的影响与波尾时间有关。当波尾时间较大时 ($t_a \geq 200 \mu s$),滑行位移随着回击电流幅值的增大而增大。然而,当波尾时间较小时 ($t_a < 200 \mu s$),回击电流幅值的变化对滑行位移产生的影响并不明显。

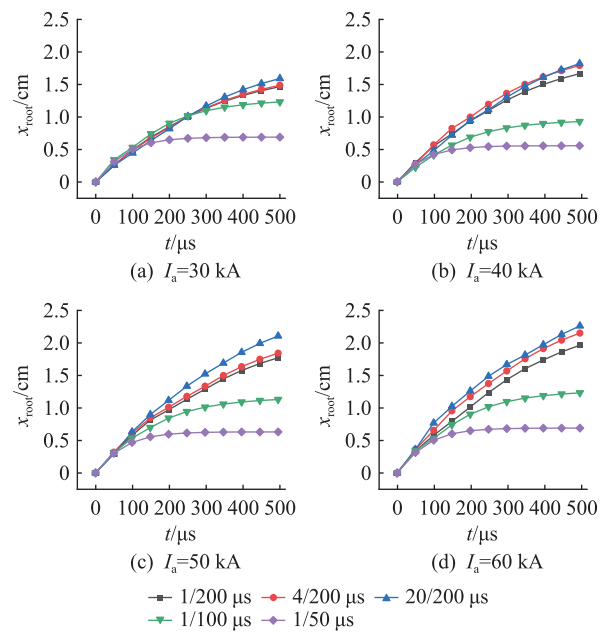


图9 回击电流下的弧根滑行位移

($|v_{wind}|=0, m=0.51, a/b \mu s$ 代表 $t_b = a \mu s, t_a = b \mu s$)

Fig.9 Sliding displacement of arc root under the action of the return stroke ($|v_{wind}|=0, m=0.51, a/b \mu s$ stands for $t_b = a \mu s, t_a = b \mu s$)

3.3 回击电流 I_{pc} +持续电流 I_{cc}

在雷击过程中,回击电流后还可能存在持续电流。因此,比3.2节更进一步的,3.3节对回击电流后存在持续电流 I_{cc} 的情况进行讨论。此时,持续电流幅值 I_{cc} 和持续时间 t_c 也会影响雷电弧根的滑行运动。

基于模型,在不同的 I_a 和 I_{cc} 条件下,雷电弧根位移 x_{root} 随时间 t 的变化情况如图10所示。由图中的曲线形状可知,雷电弧的运动过程是分阶段的。在回击电流阶段下,雷电弧根的滑行速度很快。而在持续电流阶段下,雷电弧根具有较慢且基本恒定的滑行速度,这是由于与回击电流相比,持续电流

的幅值很小且恒定,导致雷电弧根受到的电磁力相对较小。此外,由于持续电流的持续时间远长于回击电流,雷电弧根在持续电流作用下的 x_{root} 更大。对比不同子图可知,持续分量的幅值与雷电弧根的滑行位移显著正相关,而回击电流的幅值则与雷电弧根的滑行位移基本不相关。此外,雷电弧根在持续电流作用下的 x_{root} 基本上与 I_a 无关。换言之,两种电流分量下的 x_{root} 基本互不影响。

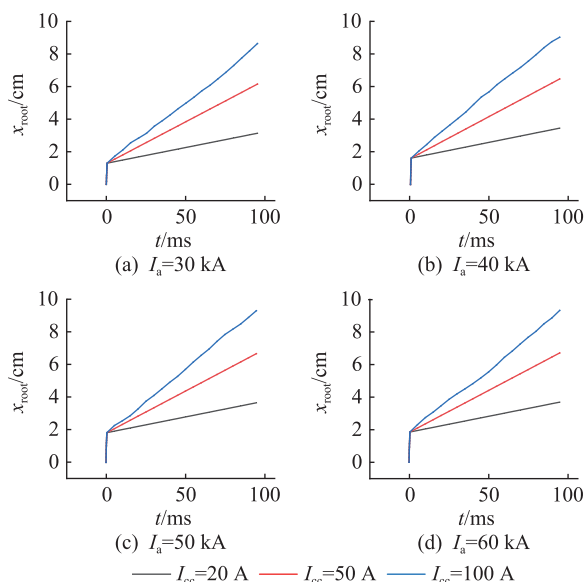


图 10 回击电流+持续电流下的弧根滑行位移
($t_\alpha=200\ \mu\text{s}$, $t_\beta=1\ \mu\text{s}$, $|v_{wind}|=0$, $m=0.51$)

Fig.10 Sliding displacement of arc root under the action of the return stroke + the continuous current
($t_\alpha=200\ \mu\text{s}$, $t_\beta=1\ \mu\text{s}$, $|v_{wind}|=0$, $m=0.51$)

4 结论

文中对雷电弧根沿着 OGW 的滑行运动进行了建模。首先,基于链式模型,根据电磁力的影响范围选取了合适的建模边界,从而得到计算量适中的雷电弧根滑行运动模型。然后,通过针-线放电实验,对模型进行了验证。最后,利用该模型对雷电弧根的滑行位移进行了影响因素分析。分析结果表明,在回击电流的作用下,热浮力的影响可以忽略。此时,雷电弧根的滑行位移与波尾时间成正相关,而与波头时间无关。而在持续电流的作用下,热浮力会影响弧根滑行位移的评估结果。所产生的最大误差达到了 28%。在未来的研究中,将会通过收集更多雷电弧根滑行运动引起的相关数据,从而对模型的合理性开展进一步的验证。

致 谢

本文得到数字孪生电网智慧运行平台关键技术研究项目(PZL2022KF0009)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 曹璞璘,黄美琴,王云龙,等. 交流线路避雷线融冰故障电磁暂态分析与间接式行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(10):11-21.
CAO Pulin, HUANG Meiqin, WANG Yunlong, et al. Electro-magnetic transients analysis and indirect traveling wave fault location for ground wires of AC transmission line amid de-icing [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 11-21.
- [2] 顾建伟,余辉,陈维江,等. $\pm 1100\ \text{kV}$ 特高压直流线路无间隙线路避雷器雷电防护适用性研究[J]. 电瓷避雷器,2023(6):126-137.
GU Jianwei, YU Hui, CHEN Weijiang, et al. Lightning protection applicability of gapless arrester in $\pm 1100\ \text{kV}$ UHV DC transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6):126-137.
- [3] 贾文彬,司马文霞,袁涛,等. 半密闭灭弧腔室内电弧运动特性的三维仿真和实验[J]. 电工技术学报,2021,36(S1):321-329.
JIA Wenbin, SIMA Wenxia, YUAN Tao, et al. 3D simulation and experiment research on arc motion characteristics in the semi-enclosed arc-extinguishing chamber[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1):321-329.
- [4] LIU G, GUO D M, LIN Z M, et al. Exceeding 50% injected lightning energy not sourced: during the analysis of an OGW rupture accident caused by multiple lightning strikes[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 143:106779.
- [5] LIY C, LI R F, LU L Y, et al. Experimental study of damage characteristics of carbon woven fabric/epoxy laminates subjected to lightning strike[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 79: 164-175.
- [6] 孙晋茹,姚学玲,许雯璐,等. 光纤复合架空地线雷电直接效应的实验研究[J]. 西安交通大学学报,2018,52(2):82-88.
SUN Jinru, YAO Xueling, XU Wenjun, et al. Lightning direct effect of optical fiber overhead ground wires under continuous two lightning components[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(2):82-88.
- [7] 孙晋茹,焦梓家,朱鑫,等. 光纤复合架空地线雷电损伤模式及影响因素的实验及仿真研究[J]. 高电压技术,2021,47(5):1872-1880.
SUN Jinru, JIAO Zijia, ZHU Xin, et al. Experimental and simulation study of damage mode and influencing factors of lightning damage to optical fiber ground wires under lightning impulse and continuous current [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5):1872-1880.
- [8] FOSTER P, ABDELAL G, MURPHY A. Understanding how arc attachment behaviour influences the prediction of composite specimen thermal loading during an artificial lightning strike test [J]. Composite Structures, 2018, 192:671-683.
- [9] RAKOV V, UMAN M. Lightning: physics and effects[M]. UK: Cambridge University Press, 2007.
- [10] 王琦. 10 kV 针式绝缘子并联间隙的结构设计优化及安装

- 方式研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- WANG Qi. Study on structural design optimization and installation mode of parallel gap of 10 kV pin insulator[D]. Chongqing:Chongqing University,2015.
- [11] 廖一帆,胡传良,唐军,等. 考虑电流元雷诺应力的绝缘子串并联间隙电弧运动特性分析[J]. 高压电器,2019,55(10):169-175.
- LIAO Yifan, HU Chuanliang, TANG Jun, et al. Analysis on arc movement in the gap between parallel insulator strings based on Reynolds stress of current element[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10):169-175.
- [12] HUANG S S, WANG J F, XU Y H, et al. The effect of a multi-fracture compression airflow arc-extinguishing structure interrupting the power frequency follow current[J]. AIP Advances, 2020, 10(3):035129.
- [13] 孙华,王宾. 基于分合闸电气量的真空断路器灭弧能力在线检测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2):102-109.
- SUN Hua, WANG Bin. Arc-quenching ability detection of a high voltage vacuum circuit breaker based on switching and closing current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2):102-109.
- [14] CHEN Y N, WANG J F, HUANG S S, et al. Study on chain arc extinguishing under the action of explosion flow[C]//2020 IEEE 1st China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE). Wuhan, China. IEEE, 2020:1-6.
- [15] 李庆民,行晋源,丛浩熹,等. 考虑潜供电弧初始位置随机性的电弧仿真模型[J]. 高电压技术, 2015, 41(6):1898-1906.
- LI Qingmin, XING Jinyuan, CONG Haoxi, et al. Arc simulation model with consideration of the initial position randomness of the secondary arc[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6):1898-1906.
- [16] SUN J R, YAO X L, XU W J, et al. Lightning test method for optical-fiber overhead ground wires[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5):2412-2419.
- [17] 王涛. 高压直流输电工程接地极线路招弧角间电弧运动研究[D]. 重庆:重庆大学,2020.
- WANG Tao. Research on arc motion between arcing horns of grounding electrode line in HVDC project[D]. Chongqing:Chongqing University, 2020.
- [18] CONG H X, WANG S Y, HAN D, et al. Study on the influence of injected lightning current on the space-time evolution of secondary arc[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(5):4537-4547.
- [19] 陈晨旭. 高速铁路电分相电弧模型与电弧运动发展规律研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
- CHEN Chenxu. Study on electric split-phase arc model and arc motion development law of high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [20] 韩正庆,陈晨旭,沈睿,等. 高速铁路电分相电弧运动发展规律研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10):3154-3163.
- HAN Zhengqing, CHEN Chenxu, SHEN Rui, et al. Research on the development laws of articulated phase insulator arc movement in high-speed railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10):3154-3163.
- [21] LIU G, GUO D M, WANG P F, et al. Assessment of lightning damage of OGW by comparing natural effects and the common Joule heat & arc heat model application[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 223:109673.
- [22] WANG Y Q, ZHUPANSKA O I. Modeling of thermal response and ablation in laminated glass fiber reinforced polymer matrix composites due to lightning strike[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 53:118-131.
- [23] FOSTER P, ABDELAL G, MURPHY A. Quantifying the influence of lightning strike pressure loading on composite specimen damage[J]. Applied Composite Materials, 2019, 26(1):115-137.
- [24] GODA Y, YOKOYAMA S, WATANABE S, et al. Melting and breaking characteristics of OPGW strands by lightning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4):1734-1739.
- [25] LI Q M, CONG H X, SUN Q Q, et al. Characteristics of secondary AC arc column motion near power transmission-line insulator string[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5):2324-2331.
- [26] 李振华,廖星锐,童悦,等. 基于动态重燃弧模型的VFTO与VFTC仿真及特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3):79-88.
- LI Zhenhua, LIAO Xingrui, TONG Yue, et al. Simulation and characteristic analysis of VFTO and VFTC based on a dynamic reignition arc model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3):79-88.
- [27] CONG H X, LI Q M, XING J Y, et al. Simulation model of secondary arc for long-distance transmission lines with multi-field coupling dynamics[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015, 48(4):423-436.
- [28] 孔佳琦,夏志坚,王巨丰,等. 35 kV 输电线路灭弧间隙的仿真分析与试验[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1):202-210.
- KONG Jiaqi, XIA Zhijian, WANG Jufeng, et al. Simulation analysis and experimental research on arc-extinguishing gap of 35 kV transmission line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1):202-210.

作者简介:



郭德明

郭德明(1994),男,博士,助理研究员,研究方向为电力设备故障分析(E-mail: guodeming_scut@163.com);

林子铭(2002),男,硕士在读,研究方向为电力设备故障分析;

刘刚(1969),男,博士,教授,研究方向为电力设备故障分析。

Modeling and analysis of sliding motion of arc root along OGW during lightning strike

GUO Deming^{1,2}, LIN Ziming¹, LIU Gang^{1,2}, WANG Peifeng¹, PENG Xiangyang³, WANG Rui³

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

2. Guangdong Artificial Intelligence and Digital Economy Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 510335, China;

3. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: Overhead ground wire (OGW) is an important equipment to prevent transmission wire from being struck by lightning. When OGW is struck by lightning, the sliding motion of arc root causes different damage mechanism. Therefore, it is necessary to analyze the sliding motion of arc root first, so as to provide data support of sliding displacement for the research of damage mechanism. In this paper, the sliding motion model of arc root along OGW is established based on the arc chain modeling method. By analyzing the main influence range of the electromagnetic force, the space boundary of modeling is narrowed, so the calculation amount is greatly reduced. Then, the model is verified by the needle-wire discharge experiment in the laboratory. Finally, based on the established model, the factors affecting the sliding displacement of arc root are analyzed, including thermal buoyancy, return stroke and continuous current. The results show that the effect of thermal buoyancy can be ignored under the action of return stroke. The sliding displacement of arc root is positively correlated with the wavelength time, but not with the wave head time. However, under the action of continuous current, thermal buoyancy affects the evaluation result of arc root sliding displacement, and the maximum error is more than 25%.

Keywords: lightning strike; arc root; sliding motion; overhead ground wire (OGW); arc chain model; return stroke; continuous current

(编辑 李栋)

(上接第 169 页)

Design and optimization of liquid cooled parallel serpentine flow channel structure for lithium battery modules

LUO Xinyuan, JIN Yang

(School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Lithium ion batteries are widely used in chemical energy storage systems. However, due to their inherent heat generation characteristics, thermal runaway has become a major safety hazard for chemical energy storage power plants. Therefore, optimizing the design of a battery thermal management system to effectively avoid thermal runaway is crucial for the safe operation of chemical energy storage systems. A new type of parallel serpentine flow channel liquid cooling plate with both series turn back and parallel branch structures is designed. Through simulation experiments, the effects of the flow channel structure of the liquid cooling plate, the layout of the liquid cooling system, and the inlet flow velocity of the coolant on the maximum temperature, temperature uniformity, and inlet and outlet pressure drop are studied to optimize the liquid cooling system. The results show that, under the same coolant inlet flow rate, the maximum temperature of the new channel is reduced by 0.284 9 K, and the temperature difference within the module is reduced by 0.466 3 K compared with the traditional parallel flow channel. The inlet and outlet pressure drop is reduced by 40.18% compared with the traditional serpentine flow channel. Based on the parallel serpentine flow channel liquid cooling plate, the optimal layout scheme for the liquid cooling system is the injection of coolant at the two split ports and the staggered arrangement of the liquid cooling plate. Different liquid cooling plates have different flow velocity settings. The inlet flow velocity of the two liquid cooling plates is set to 0.1 m/s, and the inlet flow velocity of the central liquid cooling plate is set to 0.2 m/s. Compared with the same flow velocity of 0.2 m/s for the four plates, the temperature difference within the battery module group is reduced by 13.62%, the inter column temperature difference is reduced by 82.59%, and the energy consumption is reduced by 44.87%, achieving an optimization effect of 'cost reduction and efficiency enhancement'. A reasonable flow channel structure, staggered cold plate layout, and differentiated inlet flow rate design can optimize the liquid cooling system of battery modules and increase the safety of battery module operation.

Keywords: lithium ion battery module; thermal management; liquid cooling; parallel serpentine liquid cooling plate; layout of liquid cooling plate; differential flow velocity

(编辑 陆海霞)