

10 kV 绝缘架空线路雷击断线仿真分析

胡新宇¹, 汪新秀², 杨廷方¹, 宋华伟³, 石发科¹

(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 410004;
3.国网湖南省电力有限公司检修公司,湖南长沙 410004)

摘要:为研究 10 kV 架空绝缘线路雷击断线机理,基于 COMSOL 建立绝缘导线烧蚀模型,对导线受到雷电流和工频短路电流时的烧蚀状况进行仿真,然后建立导线受力模型,分析导线被烧蚀时的受力情况。根据仿真结果,雷电流仅在导线绝缘层留下一击穿孔;若不考虑外力影响,工频电弧能在 1.3 s 内将绝缘导线烧蚀熔断。绝缘导线的力学仿真结果显示,导线在烧蚀处的张力发生突变,并且受到线间电动力及电弧电磁推力的作用。结合理论分析得出雷击断线的主要原因是导线在热学及力学共同作用下发生塑性形变及脆性断裂,造成断线,断口介于塑性断裂和脆性断裂之间。该仿真研究可为 10 kV 架空绝缘导线的防雷提供参考。

关键词:雷击断线;绝缘导线;有限元分析;电弧烧蚀;受力分析

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.018 中图分类号:TM86 文章编号:1673-9140(2023)02-0161-07

Simulation analysis of lightning stroke breaking of 10 kV insulated overhead transmission line

HU Xinyu¹, WAN Xinxiu², YANG Tingfang¹, SONG Huawei³, SHI Fake¹

(1.School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.Electric Power Science Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China; 3.Maintenance Company, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: In order to study the breaking mechanism of 10 kV overhead insulated lines by lightning, an ablation model of insulated conductors is established based on COMSOL, and the ablation status of the conductors when suffering lightning current and power frequency short-circuit current is simulated respectively. Then the force model of the conductor is established to analyze the conductor force when ablating. Simulation results indicate that, the lightning current only leads to one perforation on the conductor insulation layer. The power frequency arc can ablate and fuse the insulated wire in 1.3 s without considering the effect of external forces. The mechanical simulation results of the insulated conductor show that the tension of the conductor suffers abrupt changes at the ablation site, and the electromotive force between the wires and the electromagnetic thrust of the arc act on this site. Combined with theoretical analysis, it is concluded that the main reason for the line breakage caused by lightning is the combined action of heat and mechanics, which results in plastic deformation and brittle fracture. The simulation research provides a reference for lightning protection of 10 kV overhead insulated conductors.

Keywords: lightning strike broken line; insulated conductor; finite element analysis; arc ablation; force analysis

收稿日期:2021-05-08;修回日期:2021-06-25

基金项目:国家自然科学基金(51777015)

通讯作者:杨廷方(1975—),男,博士,副教授,主要从事电力系统绝缘的研究;E-mail:2630544839@qq.com

为了提高配电线路的供电可靠性,中国于20世纪90年代初开始将架空裸导线换成绝缘强度高的架空绝缘导线^[1]。此举虽能大幅减少因短路故障而产生的线路跳闸事故,但也导致雷击断线事故数上升^[2-4]。根据资料显示,中国城市配电网雷击跳闸次数占故障跳闸比率的8%左右,而其中导线断线约占49%^[5-6]。

为解决架空绝缘导线雷击断线的问题,对雷击断线过程的机理分析成为了研究热点。近年来,国内研究专家对雷击断线的机理分析开展了大量的研究工作。文献[7]通过进行雷击10 kV架空线路发生故障的模拟实验,得出结论:雷击放电只在导线绝缘层留下针孔状的凹坑,相间短路引起的工频电弧在针孔处稳定燃烧,造成绝缘导线烧伤断线。但作者并未考虑力对导线断线的影响。文献[8]通过建立链式电弧模型对工频电弧的运动演变进行仿真。但结果仅能表明电弧弧根固定在很小一段位置燃烧,无法反映电弧对导线的烧蚀程度。文献[9]通过分析表明,导线在工频电弧所产生的交变电磁力及重力的共同影响下,发生整齐断线,断口特征介于韧性断裂与脆性断裂之间。但并未通过实验或仿真进一步论证该观点。

本文通过COMSOL仿真平台建立绝缘导线烧蚀模型以及发生线路短路故障时绝缘导线受力分析模型,仿真研究雷电流和工频短路电流对绝缘导线的烧蚀过程,以及线路发生故障短路时导线的受力情况。从热学及力学2个方向来分析雷击断线机理,为10 kV架空绝缘线路雷击断线的研究及防护措施提供参考。

1 绝缘导线试样及仿真模型

本文以标称截面为185 mm²的10 kV架空绝缘导线作为仿真对象,其型号为JKLGYJ-185/25。导线结构及对应的仿真模型如图1所示,导线规格参数如表1所示。

导线在制作过程中,铝线被压制变形,因此仿真模型中铝线由圆形简化成等分扇形,这样与实际情况更贴切。若采用圆形,则铝线之间留有一定空隙,不利于仿真计算中电流及热的传导,影响计算

的收敛性。由于工频短路电流易在雷电击穿点处固定燃烧,因此,只仿真雷击击穿点左右各25 mm长的部分。

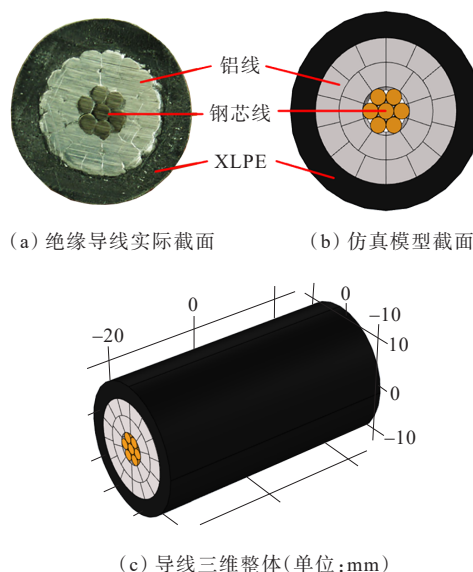


图1 导线内部结构及仿真模型

Figure 1 Structure and simulation model of the conductor

表1 导线规格参数

Table 1 Specification parameters of conductor

项目	规格	数量	备注
最外层	XLPE ^a	1层	厚度3.40 mm
中间层	无氧铝	24(10+14) ^b	单线直径3.15 mm
中心层	钢芯	7(1+6)	单线直径2.10 mm
导线直径	18.9 mm	—	—
导线外径	25.7 mm	—	—

注:a.XLPE代表交联聚乙烯;b.括号中表示各层中铝或钢的数量,如10+14表示铝线分2层,内层为10根,外层为14根

2 绝缘导线的电弧烧蚀模型

2.1 绝缘导线的电弧烧蚀原理

导线被烧蚀的主要原因是电弧弧根在雷电击穿点的固定燃烧,其热源来自于弧根在燃烧过程中对导线表面的对流散热及辐射散热。由于绝缘层的存在,导线与空气换热的效率较差,导线被电弧烧蚀的时间短,因此,导线内部的传热方式以热传导为主。在整个烧蚀过程中,导线材料的热变化可分为2个过程,即以热传导方程描述的升温过程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q \quad (1)$$

式中, ρ 为材料密度, kg/m^3 ; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为材料的温度, K ; λ 为材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; Q 为热源。

在该过程中, 导线在热流密度的作用下出现局部温升的现象, 但此时导线形态并不会发生改变。当温度逐渐升高, 材料的温度达到其熔点时, 材料开始发生相变, 由固体转化为液态。一旦材料转化为液态, 其抗拉强度大幅降低, 导线极易被拉断。因此, 认为导线发生融化的部分进入到热变化的第 2 个过程, 即烧蚀过程。并将转为液态的部分从模型中剔除, 该过程可用材料的烧蚀方程所描述:

$$v = -\frac{Q(r)}{\rho H_q} \quad (2)$$

式中, v 为材料的烧蚀速度, m/s , 由于融化总优先发生在导线表面, 因此导线材料的烧蚀方向由外到内; $Q(r)$ 为导线表面的热流密度; H_q 为材料由固态转为液态时所吸收的热量, 即融化潜热, kJ/kg 。

导线被烧蚀的状态如图 2 所示。由于热流密度多集中于热源中心处, 故此处的烧蚀速度远大于热流边缘, 这使得导线外表出现一个凹坑。

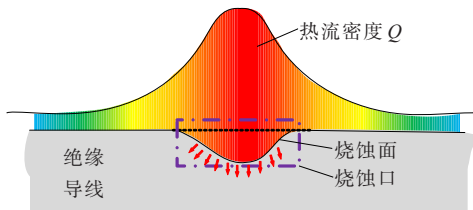


图 2 导线烧蚀状态

Figure 2 Schematic diagram of wire ablation state

2.2 热流密度分布的确定

电弧弧心温度远高于电弧外围温度, 弧根在导线表面产生的热流密度大部分集中在中心, 因此, 采用高斯函数近似描述热流密度的分布^[10], 即

$$Q(r) = Q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{r_h^2}\right) = UI \exp\left(-\frac{3r^2}{r_h^2}\right) \quad (3)$$

式中, $Q(r)$ 为距离中心热源 r 处的热流密度, W/m^2 ; Q_m 为热流密度幅值, W/m^2 ; r_h 为中心热源半径, m ; U 为电弧的压降, V ; I 为电弧电流, A 。

雷电流及工频短路电流对导线的放电过程可通过构建二维针—板放电模型近似代替, 基于磁流体动力学 (magneto hydro dynamic, MHD) 原理构建有限元模型, 如图 3 所示。

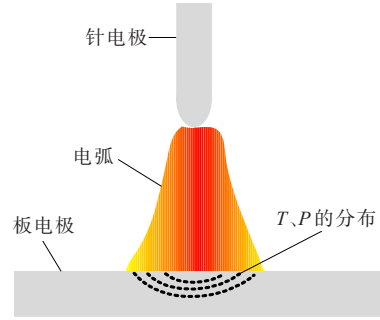


图 3 针—板放电模型

Figure 3 Needle-plate discharge model

通过在针电极处加载雷电流 (或工频短路电流) 产生电弧, 在板电极上可得到随时间变化的温度分布以及电弧对板电极的压力分布变化情况。电弧电流即为加载在针电极处的电流, 电压 U 可由针板间的电势差所求出, 而 r_h 可由板电极的温度分布所确定, 因此热流密度的分布也可被确定。

2.3 边界条件的设定

文献[11]中指出在距变电站 1~2 km 后, 三相短路电流可降至母线短路额定容量的一半以上。因此, 本文采用 5 kA 的相间工频短路电流及幅值为 20 kA 的 1.2/50 μs 标准雷电流进行仿真。仿真中所需的导线材料参数如表 2 所示。

表 2 导线材料参数

Table 2 Material parameters of conductor

材料	密度/ (kg/m^3)	比热容/ ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	熔点/ K	潜热/ (kJ/kg)
铝	2 700	880	933	397.0
钢	7 850	460	1 773	247.3
XLPE	1 200	2 300	413	65.0

2.4 仿真计算结果

烧蚀过程中不同材料导线的温升和熔点不同。通过归一化处理, 采用烧蚀率描述导线的烧蚀程度:

$$\eta = \frac{T - T_{\max}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (4)$$

式中, η 为烧蚀率, $\eta = 0$, 表示材料未发生烧蚀; $\eta = 1$, 表示导线处于烧蚀状态; $0 < \eta < 1$ 则处于升温状态; T 为导线温度; T_{\max} 为导线各种材料的熔点; T_{\min} 为参考温度, 即常温。

2.4.1 雷电流烧蚀

雷电流功率大,但作用时间短,热量无法在导线内部横向扩散,产生的热流密度绝大部分集中在一点。雷电流烧蚀 50 μs 时的仿真结果如图 4 所示,导线在雷电流的烧蚀下,仅在绝缘层留下一条针孔状的烧蚀孔,导线内部的铝线及钢芯并未损伤。

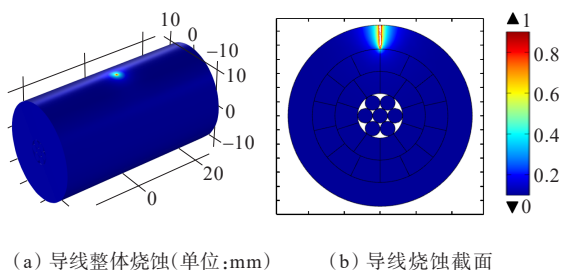


图 4 雷电流烧蚀情况

Figure 4 Lightning current ablation situation

2.4.2 工频短路电流烧蚀

相间短路电流引起的电弧作用时间长,且能够固定在雷击点处稳定燃烧,对导线的危害远大于雷电流。不同时刻下导线的烧蚀程度如图 5 所示。

仿真结果表明,导线被烧蚀的烧蚀口呈一凹坑,这是由于热源集中在中心,中心部分的烧蚀速度快于边缘区域。随着时间的增加,导线被烧蚀的越来越严重,直至 1.3 s,导线被完全熔断。

导线内铝线及钢芯断股数随烧蚀时间的变化情况如图 6 所示,可知导线在 0.5 s 时,铝线断股 10 根,钢芯断股 2 根,显然此时的导线并没有完全被熔断。但一般线路的过流保护在 0.5 s 左右,而导线在保护动作前就会断线,此时可认为导线不单被电弧燃烧而熔断,显然还受到了其他因素的影响,因此还需对导线的受力关系进行分析。

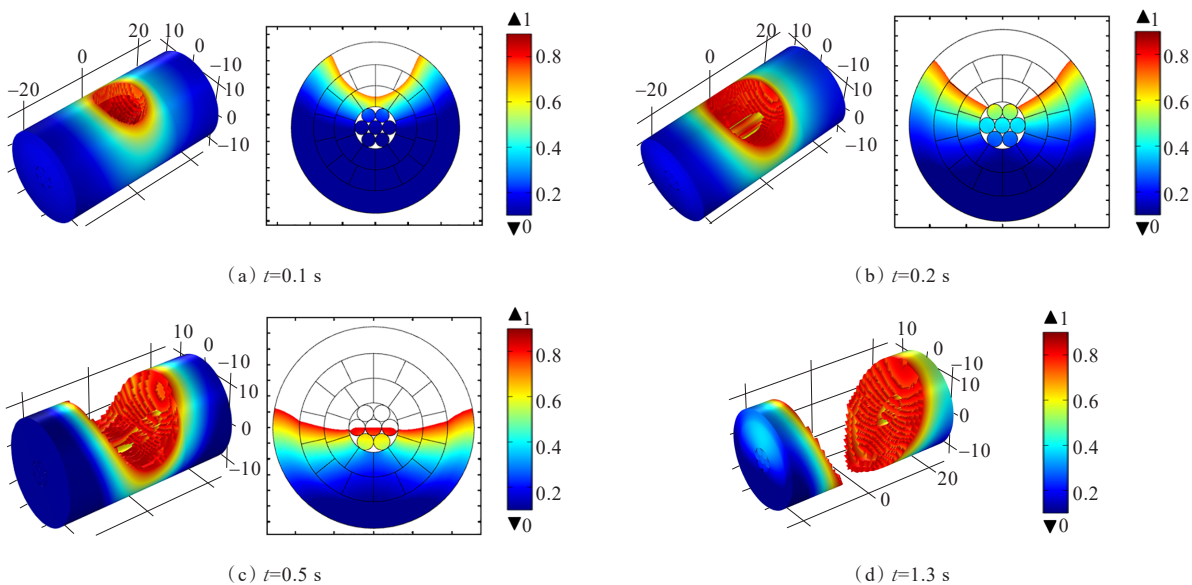


图 5 工频电流烧蚀情况(单位:mm)

Figure 5 Power frequency current ablation situation(Unit:mm)

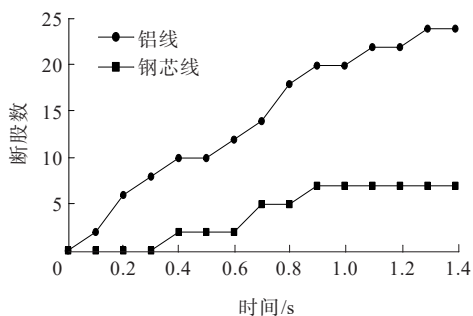


图 6 导线断股数与烧蚀时间的关系

Figure 6 Relationship between broken wires numbers and ablation time

3 绝缘导线的力学模型

导线被工频电弧烧蚀时受到的力可分为 2 类: ① 轴向分量,主要是导线本身重力产生的张力 F_1 , 该张力分布于导线各处; ② 径向分量,主要是三相导线之间的电动力 F_2 及工频电弧对导线烧蚀口处的电磁力 F_3 。各力分布如图 7 所示。

以工频电弧烧蚀导线的结果作为力学分析模型的初始条件,分别仿真重力引起的张力、电动力

及电磁力对导线的影响。同时为了保证仿真的合理性,根据规程 DL/T 5220—2005 假设^[12]:①三相导线水平排列,导线之间相隔 0.5 m;②该段导线处在相距 50 m 的水平杆塔之间,弧垂为 1 m;③暂不考虑风力的影响;④对最外侧导线进行受力分析。

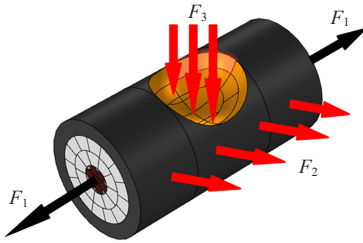


图 7 导线的受力分布

Figure 7 Force distribution of conductor

3.1 重力引起的张力对导线的影响

由重力引起的张力分布于绝缘导线各处,且各处的张力大小不一样。由于雷点击穿点多分布于绝缘子附近 100~200 mm 处,因此,通过建立只考虑重力影响下的导线受力模型,仿真计算得到该处的张力大小为 $4.6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$,再将该张力加载至上述力学模型中,即可得到烧蚀口处的张力分布,如图 8 所示。

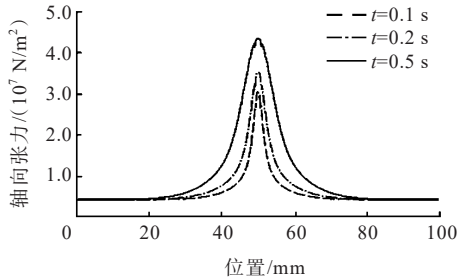


图 8 导线烧蚀处的张力分布

Figure 8 Tension distribution at the wire ablation site

仿真结果表明,张力在烧蚀处发生突变。当电弧烧蚀 0.1 s 时,张力最大值达到了 $3.1 \times 10^7 \text{ N/m}^2$,为正常情况的 6.7 倍。随着工频电弧的不断烧蚀,烧蚀处的张力也不断增加,可达到正常情况下的数 10 倍。这是由于烧蚀口处部分导线被电弧烧蚀融化,使该部分的抗张强度大幅降低。同等大小的力作用在不同面积上,显然面积小的会受到更强的张力。因此,导线的烧蚀处相比于其他正常区域更容易发生断线,且烧蚀程度越严重,断线几率越大。

3.2 线间电动力对导线的影响

载流导线会产生交变的磁场,另一条载流导线在该磁场中会受到电动力的作用。额定运行下工作电流较低(一般小于 500 A),电动力很小。但短路电流能达到正常工作电流的数 10 倍,因此导线间的短路电动力对雷击断线的影响是不可忽略的。由于线间距离远大于导线直径,因此,可认为导线产生的感应磁场在导线附近区域是均匀的。

载流导线产生的磁场大小及导线所受电动力大小可描述为

$$B_1 = \mu_0 \frac{i_1}{2\pi a} \tag{5}$$

$$F = \int_0^L B_1 i_2 dl \tag{6}$$

式(5)、(6)中, μ_0 为真空磁导率; i_1 、 i_2 为通入导线的电流,A; a 为线间距离,m; L 为导线长度,m。

利用式(5)可求出导线所受磁场的大小,通过在模型中加载该磁场,仿真计算导线所受电动力随时间的变化情况。分别求解正常运行(假设工作电流为 450 A)及三相短路(5 kA)2 种情况下的电动力,其结果如图 9 所示。

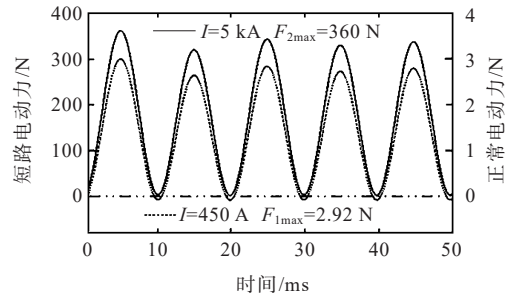


图 9 线间电动力对比

Figure 9 Electrodynamic force comparison between lines

仿真结果表明,电动力为交变的力。正常情况下电动力很小,幅值 $F_{1\max}$ 为 2.92 N,不会对导线造成影响。当发生三相短路时,在短路电流的作用下,电动力幅值 $F_{2\max}$ 可达 360 N,远大于正常运行下的电动力。电动力作用于导线各处,短路电动力过高可能会使得导线发生变形,影响导线的抗拉强度,为导线断线提供可能。

3.3 电弧电磁力对导线的影响

电弧对导线的电磁推力主要来自于电弧等离子体的冲击作用,在导线烧蚀面处形成非常高的压

力差,压力差会随着电流的变化发生交变^[13]。烧蚀面的压力分布情况可由前述的针板模型求出,再通过压强公式对烧蚀面上的电磁力进行面积分,即可反推出导线所受电磁总力的大小,其结果如图10所示。

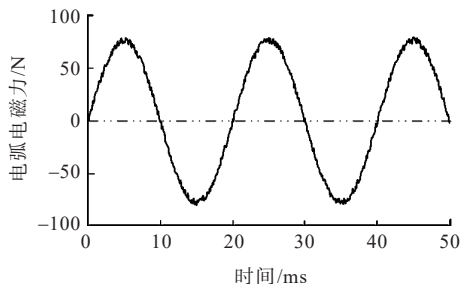


图10 导线烧蚀处电弧电磁力随时间的变化

Figure 10 Variation of arc electromagnetic force with time at the conductor ablation site

仿真结果表明,电弧的电磁推力是交变的力,其最大值可达80 N。对于绝缘导线来说,电弧电磁力为冲击载荷,且集中在烧蚀口处,这样加速了导线烧蚀口处的疲劳损伤。

4 仿真结果分析

本文通过建立绝缘导线的电弧烧蚀模型,仿真了雷电流及工频短路电流下的导线烧蚀情况,仿真结果表明:雷电流仅在导线绝缘层留下击穿孔,工频短路电流能对绝缘导线产生严重的烧蚀,时间过长,导线会被烧蚀熔断。对比文献[7]中雷击放电及工频电弧燃烧实验,本文仿真与该实验具有相似的结果,证明本文模型具有较高的可信度。

绝缘导线在烧蚀过程中还受到力的作用。由于工频电弧的持续燃烧,烧蚀处的导线被融化,导线张力在此处发生突变,导线因此发生塑性形变。随着烧蚀口不断扩大,塑性形变会更加严重,直至导线断线。但值得注意的是,导线在此过程中不单只受因重力引起的2向张力的影响。短路电动力及电弧电磁力这类径向冲击载荷也作用在导线上。

文献[14]指出,即便是延展性好的金属,若材料存在缺陷(如裂纹)也会发生脆性断裂,发生脆性断裂的原因一般是冲击,而非过载。雷电流在击穿导线绝缘层时也会在导体表面留下裂纹^[9],并且导

线在制作过程中不可避免的留下一些微裂纹。这2种裂纹在电弧电磁力及电动力的反复作用下进一步扩展,当裂纹尺寸达到临界尺寸时,导线会发生低应力脆断。因此,导线在发生塑性形变的过程中也会脆性断裂。这也很好地解释了导线断口截面(图11)处于塑性断裂和脆性断裂之间的原因。



图11 导线断口截面

Figure 11 Fracture section of insulated conductor

综上所述,雷击断线的机理可总结为雷击绝缘导线在其绝缘层留下针孔状的凹坑,使得工频续流电弧在此针孔处稳定燃烧,形成烧蚀凹坑。同时,导线在自身重力引起的张力、电弧所产生的交变电磁力及线间电动力3向应力的共同作用下,导线的电弧烧蚀处发生塑性形变,直至脆性断裂,最终导线断线。

5 结语

本文结合热学及力学,研究了不同电流及受力情况下对导线断线的影响。基于COMSOL建立了绝缘导线烧蚀模型以及受力模型。仿真分析了电弧对绝缘导线的烧蚀情况以及导线的受力情况,通过仿真结果可得到以下结论:

1) 雷电流对导线的烧蚀影响不大,仅在绝缘层留下击穿孔;工频短路电流对导线的烧蚀影响较大,在不考虑其他外力的影响下,绝缘导线在5 kA工频电弧的燃烧下,完全被烧蚀熔断时间仅需1.3 s;

2) 导线因工频电弧的烧蚀处张力发生突变,能达到正常情况的数10倍;同时烧蚀处还受到交变电弧电磁力的作用,其幅值可达80 N;短路电流还会引起线间电动力激增,其值远大于额定运行下的线间电动力;

3) 绝缘导线发生断线的主要原因是工频电弧烧蚀及张力、电弧电磁力、电动力3向应力的共同作用。

参考文献:

- [1] 韩晋平,王晓丰,马心良,等.10 kV架空绝缘导线雷击过电压与防雷综合措施研究[J].高电压技术,2008,34(11):2395-2399.
HAN Jinping, WANG Xiaofeng, MA Xinliang, et al. Research on comprehensive protections of 10 kV overhead insulated distribution lines from lightning[J].High Voltage Engineering,2008,34(11):2395-2399.
- [2] 张淼,汤心韵,周力行,等.电站10 kV连续倾斜架空线防雷配置改造[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):169-174.
ZHANG Miao, TANG Xinyun, ZHOU Lixing, et al. Power station 10 kV continuous tilt lightning protection reformation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(2):169-174.
- [3] 杨鑫,刘真,仇炜,等.10 kV架空绝缘导线防雷击断线用非穿刺式带间隙金属氧化物避雷器[J].电网技术,2018,42(9):3086-3092.
YANG Xin, LIU Zhen, QIU Wei, et al. An MOA with series gap and non-piercing electrode for preventing lightning breakage of 10 kV overhead insulated lines[J]. Power System Technology,2018,42(9):3086-3092.
- [4] 夏永强,冯海超,郑智勇.10 kV绝缘导线防断线用避雷器串联羊角间隙的距离确定方法[J].电力科学与技术学报,2019,34(1):136-141.
XIA Yongqiang, FENG Haichao, ZHENG Zhiyong. Study on the distance determination method of angle gap in series with an anti-break lightning arrester for 10 kV insulated wires[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(1):136-141.
- [5] 周斌,陈梦琦,郑海涯,等.谐振接地系统单相断线并坠地故障电压特征仿真分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(17):93-100.
ZHOU Bin, CHEN Mengqi, ZHENG Haiya, et al. Simulation analysis of voltage characteristics of a single-phase line-broken and grounding fault in a resonant grounded system[J]. Power System Protection and Control,2021,49(17):93-100.
- [6] 李炜,杨廷方,张磊,等.配电线路避雷器分频式脱离器动作特性数值分析[J].中国电力,2022,55(1):189-195.
LI Wei, YANG Tingfang, ZHANG Lei, et al. Numerical analysis of operating characteristics of frequency-dividing disconnectors for distribution line surge arresters[J]. Electric Power,2022,55(1):189-195.
- [7] 戴志辉,陈思琦,李毅然,等.复杂环状柔直配电网单极断线故障特性分析[J].电工技术学报,2022,37(5):1229-1241.
DAI Zhihui, CHEN Siqi, LI Yiran, et al. Characteristic analysis of single-pole breakage fault in complex ring flexible DC distribution systems[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(5):1229-1241.
- [8] 丛子涵,刘亚东,王鹏,等.10 kV配电网断线坠地故障地表电势分布及安全距离研究[J].高压电器,2022,58(4):101-107.
CONG Zihan, LIU Yadong, WANG Peng, et al. Study on surface potential distribution and safety distance of disconnected grounding fault in 10 kV distribution network [J].High Voltage Apparatus,2022,58(4):101-107.
- [9] 王国锋.基于多重雷击防护的爆轰气流灭弧机理研究[J].电测与仪表,2021,58(1):84-90.
WANG Guofeng. Research on explosion airflow arc-extinguish mechanism based on multiple lightning strike protection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2021,58(1):84-90.
- [10] 胡庆贤.穿孔等离子弧焊接温度场的有限元分析[D].济南:山东大学,2007.
HU Qingxian. Finite element analysis of temperature fields in keyhole arc welding[D]. Jinan: Shandong University,2017.
- [11] 付松林,何光华,徐骏,等.大段长高压电缆护层保护器暂态特性分析与参数优化设计[J].电网与清洁能源,2021,37(1):32-41.
FU Songlin, HE Guanghua, XU Jun, et al. Transient characteristic analysis and parameter optimization of sheath protector for large-length high voltage cable[J]. Power System and Clean Energy,2021,37(1):32-41.
- [12] 卢正飞,朱可凡,刘子俊,等.基于电压降落比较的高压架空线路断线保护原理[J].智慧电力,2021,49(1):9-13+55.
LU Zhengfei, ZHU Kefan, LI Zijun, et al. High-voltage overhead line breakage protection based on voltage drop comparison[J].Smart Power,2021,49(1):9-13+55.
- [13] 田君国,邓晶,李要建,等.自由燃烧电弧的磁流体动力学数值模拟[J].力学学报,2011,43(1):32-38.
TIAN Junguo, DENG Jing, LI Yaojian, et al. Numerical simulation for a free-burning argon arc with MHD model [J].Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011,43(1):32-38.
- [14] 陈祝年.焊接工程师手册[M].北京:机械工业出版社,2004:352-356.
CHEN Zhunian. Handbook for welding engineer[M]. Beijing:China Machine Press,2004:352-356.