

直流接地极线路招弧角间电弧的运动模型

王涛¹ 郑连清¹ 范松海² 官瑞杨³ 孙鹏宇¹

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学) 重庆 400044;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610041;

3. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系) 北京 100084)

摘要: 针对直流接地极线路在遭受雷击和操作过电压时容易在绝缘子串间建立起电弧的问题,采用链式电弧模型,考虑电流元受磁场力、热浮力和空气阻力的作用以及电流元在不同运动速度下空气阻力系数与雷诺数之间的关系,分析电流元的受力,得出电弧的运动模型。通过仿真分析直流电弧在羊角型电极间的运动过程,发现直流电弧的熄弧时间与电流大小、电极张角之间存在相关关系,电弧电流和电极张角越大,直流电弧的熄弧时间越短。仿真研究结果为后续进行直流电弧试验提供理论依据。

关键词: 直流电弧; 招弧角; 电弧电流; 电极张角; 运动模型

中图分类号: TM86 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)04-0011-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.04.003

Motion Model of Arc between Arcing Horns in DC Grounding Electrode Line

Wang Tao¹, Zheng Lianqing¹, Fan Songhai², Guan Ruiyang³, Sun Pengyu¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Aiming at the problem that DC grounding electrode line is easy to build arc between insulator strings when subjected to lightning stroke and operating overvoltage, the chain arc model is adopted to consider the effect of magnetic field force, thermal buoyancy and air resistance on current element, and the relationship between air resistance coefficient and Reynolds number under different moving speeds of current element. The force of current element is analyzed and the motion model of arc is obtained. Through simulation and analysis of the movement of DC arc between sheep-horn electrodes, it is found that there is a correlation between the extinguishing time of DC arc and the magnitude of current and electrode opening angles. The bigger the arc current and the electrode opening angle, the shorter the extinguishing time of DC arc. The simulation research provides a theoretical basis for the subsequent DC arc test.

Key words: DC arc; arcing horn; arc current; electrode opening angle; motion model

0 引言

在直流输电工程中,当接地极线路处于满负荷运行状态,遭受雷击或操作过电压时,高电压可能会击穿绝缘子周围的空气间隙,引起直流电弧的持续燃烧,使绝缘子受到高温灼烧。目前采用在绝缘子

两端并联招弧角的方法来避免直流电弧的灼烧。

国内对招弧角熄弧特性的试验研究起步较晚,且主要集中在对交流电弧的研究。文献[1]对接地极线路招弧角熄弧能力展开研究,通过燃弧试验获取电弧伏安特性曲线,但是该实验仅能输出毫秒级的高压脉冲,无法维持长时间的燃弧。文献[2]对直流小电流下不同气体电弧的图像特性进行了分

析,发现随着电弧电流的减小,电弧半径减小,电弧亮度降低,电弧变得不稳定,同时随着气体压强的增大,电弧中心的亮度升高。文献[3]对短间隙模型的直流输电线路极间短路电弧的运动进行仿真研究,采用链式电弧模型,建立了电弧的速度控制方程,并构建了小尺度试验研究平台对仿真进行了验证。目前对直接地极线路招弧角间电弧的运动研究较少,没有建立起电弧在招弧角间的运动模型,对于不同电弧电流和电极张角的情况下,电弧的爬升距离与速度之间没有确定的关系。

国外较早就进行了直流电弧的研究,文献[4]通过试验拟合出了电流和电弧长度的关系式。早期的直流电弧研究主要是通过试验观测其伏安特性,并拟合成公式^[5-12]。由于早期试验条件的限制,拟合公式都是基于有限的试验次数,没有建立标准的试验步骤和一致的测量方法。

基于上述研究现状,下面充分考虑空气流动的影响,基于电磁学、热力学和流体力学,采用链式电弧模型,推导出直流电弧的运动特性方程,在Matlab中编程对直流电弧的运动过程进行仿真分析,为在实验室进行直流电弧试验提供理论参考。

1 羊角型招弧角间直流电弧运动模型

1.1 招弧角间直流电弧受力分析

基于羊角型招弧角研究直流电弧运动模型。由于电弧燃烧时的运动比较复杂,电弧的运动实际为高温气体在多种受力下的流动,电弧形状会发生无规律的变化,并不能简单地将电弧等效为圆柱形刚体。因此,采用链式电弧模型,将弧柱离散为一系列电流元,如图1所示。当电流元数目足够多时,可将电流元看作刚体,分析每一段电流元的受力及运动过程,最后得出整个电弧的运动过程。

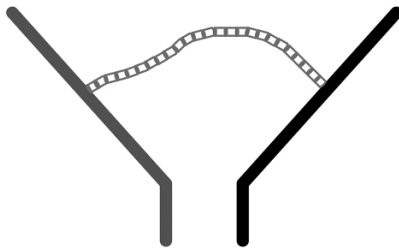


图1 羊角型招弧角间链式直流电弧模型

首先当电弧燃烧时,弧柱区温度高达4000~50000K,因此电流元会受到热浮力的作用;其次,当电弧维持燃烧时,电弧电流可达数百至数千安培,还需考虑电流元所受磁场力影响;再次,由于电弧运动时速度较快,需考虑空气阻力的影响^[3];最后,为建立更加贴近实际的电弧运动模型,需要考虑电流元质量。

电流元所受热浮力 F_{bi} 大小由式(1)决定,方向竖直向上,如图2所示。

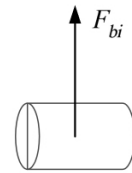


图2 电流元所受热浮力

$$F_{bi} = (\rho_0 - \rho) g \pi R_i^2 L_i \quad (1)$$

式中: ρ_0 为标准大气压中空气密度,值为 1.29 kg/m^3 ; ρ 为弧柱区空气密度,根据文献[13]可将电弧看作高温气体,其密度与温度有关; g 为重力加速度,取值为 9.8 m/s^2 ; L_i 为电流元长度; R_i 为当前时刻电弧电流元的半径,cm。 R_i 与电流大小有关,当电弧静止时 $R_i = 0.27\sqrt{I}$;当电弧运动时 $R_i = 0.08\sqrt{I/v_i}$, v_i 为电流元运动速度大小。

每一个电流元所处位置的磁感应强度为其他各电流元在该处所产生磁感应强度矢量和,可根据毕奥-萨伐尔定律求得第*i*个电流元处的磁感应强度为

$$B_i = \sum_{j=1}^m B_j \quad (2)$$

式中 m 为离散电流元数目 $i \neq j$ 。

第*i*个电流元所受的磁场力为

$$F_{mi} = L_i I \times B_i \quad (3)$$

式中 I 为电弧电流矢量。电流元所受磁场力方向如图3所示。

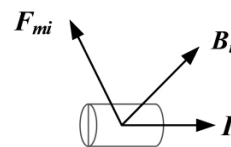


图3 电流元所受磁场力

在实际输电线路,电流元区域的磁场由传输线和电弧电流共同决定,但是对电弧运动影响最大的是电弧本身电流^[14]。由于在实验室条件下无法模拟实际输电线路,所以仅考虑电弧电流本身所产

生的磁场。

根据空气动力学理论,电流元在空气中运动时受到的阻力与电流元运动速度有关,关系如式(4)所示,阻力方向与速度相反。图4为空气阻力示意图。

$$F_{ii} = C_D (2R_i L_i) \left(\rho \frac{v_i^2}{2} \right) = C_D R_i L_i \rho v_i^2 \quad (4)$$

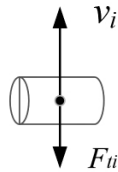


图4 电流元所受空气阻力

式中: v_i 为第 i 个电流元速度; C_D 为空气阻力系数,由雷诺数 Re 决定。雷诺数 Re 又与电流元速度有关,对应关系为。

$$Re = \frac{\rho v_i \lambda}{\mu} \quad (5)$$

式中: ρ 为空气密度; μ 为空气粘性系数; v_i 为电流元速度; λ 为特征长度。

根据尼古拉兹实验曲线,在 $Re < 2000$ 时为层流运动,此时空气阻力系数与雷诺数关系为^[15]

$$C_D = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

当 $2000 < Re < 4000$ 时,为层流向紊流的过渡区,此时空气阻力系数与雷诺数关系为

$$C_D = \frac{0.3164}{\sqrt{Re}} \quad (7)$$

当 $Re > 4000$ 时,为紊流区,此时空气阻力系数与雷诺数关系为

$$C_D = \frac{1}{4 \left(\lg \frac{Re}{4.5223 \ln Re - 3.8215} \right)^2} \quad (8)$$

根据牛顿第二定律,

$$F_{bi} + F_{mi} + F_{ii} = m_i a_i \quad (9)$$

$$v_i = v + a_i dt \quad (10)$$

$$x_i = x + v_i dt \quad (11)$$

式中 v_i 、 x_i 为电流元的速度和位置矢量。当程序运行的步长较小时,可以认为在这一时间段内电流元做匀速运动。

1.2 直流电弧运动仿真流程

直流电弧在羊角型招弧角间燃烧时,会出现向上爬升的现象,导致电弧被拉长,当达到一定长度

时,电弧被拉断熄灭,电弧熄灭长度可由式(12)得到^[16]。

$$L_{\max} = 0.71 I_a^{0.25} U_a \times 10^{-4} \quad (12)$$

式中 U_a 、 I_a 分别为电弧电压和电弧电流。

根据上述分析,仿真流程如图5所示。

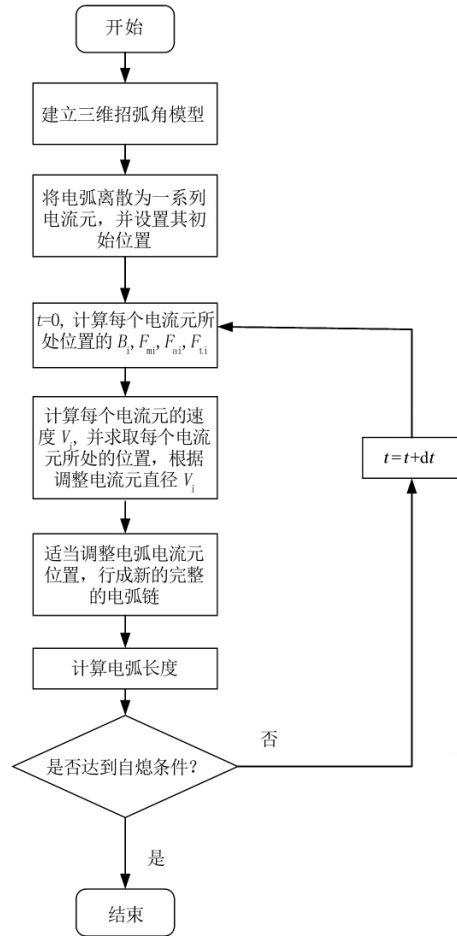


图5 仿真流程

2 羊角型招弧角间直流电弧运动仿真分析

所采用的仿真模型参数为:电极长度为0.5 m;羊角型招弧角电极张角分别为17°、34°、60°;电极根部间距为0.01 m;电弧电流为150~600 A。分别对相同电流、不同电极张角的直流电弧运动以及对不同电流、同一电极张角的直流电弧运动进行仿真。图6所示为仿真模型结构图。

2.1 电流大小对电弧运动的影响

由于在发生雷击时,电弧总是在最短间隙处建立,所以仿真中将电弧初始位置设置在电极最下端,

仿真步长为 $1 \mu\text{s}$ 。图7所示为 600 A 电弧在 17° 张角电极间的运动过程。

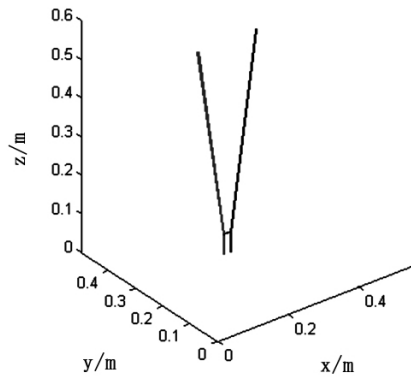


图6 仿真模型结构

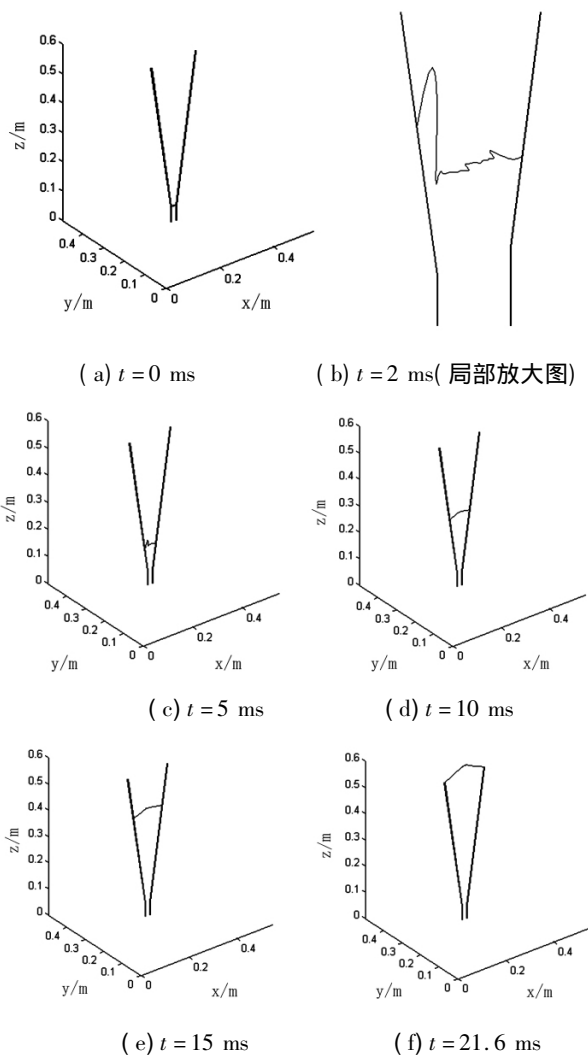


图7 电极张角 17° , 600 A 电流电弧运动过程

通过仿真分析: 电弧在燃烧时, 由于弧柱区温度较高, 电弧受热浮力的作用, 并在电磁力和空气阻力的共同作用下沿电极向上爬升, 电弧被拉长; 最后当电弧运动到电极根部时, 电弧还未达到熄弧的长度时, 电弧被继续拉长, 弧长达熄弧长度时电弧熄灭。

通过对 17° 电极张角、 $150 \sim 600 \text{ A}$ 电流电弧的仿真分析, 得到电流与熄弧时间的对应关系如表1所示。

图8所示为熄弧时间-电弧电流折线图。

当电弧电流增大时, 电弧熄灭所需达到的弧长也增加, 但是电弧所受磁场力增大, 电弧半径也增大, 从而热浮力也增加, 电弧在竖直方向的受力也增加, 电弧可以更快速地被拉长使熄弧时间变短。

表1 不同电流电弧的熄弧时间

电弧电流 I/A	熄弧时间 t/ms	电弧电流 I/A	熄弧时间 t/ms
150	45.3	390	39.8
170	44.6	400	25.3
190	44.2	420	24.5
200	44.1	450	24.7
220	44.2	470	22.9
250	43.9	490	23.1
270	43.6	500	22.2
290	42.5	520	22.0
300	42.1	540	21.9
320	42.4	560	21.8
340	41.3	580	21.7
350	41.1	600	21.6
370	41.1		

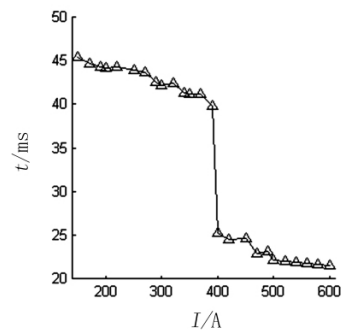
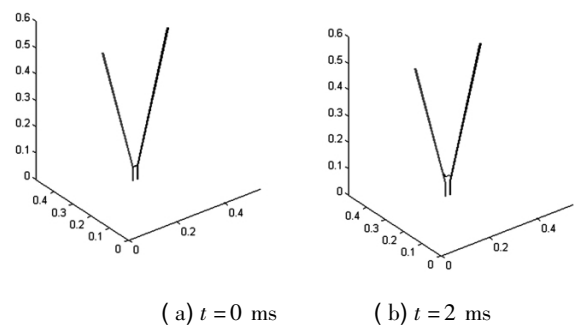


图8 电弧电流与熄弧时间对应关系

2.2 电极张角对电弧运动的影响

分别对 600 A 电弧在不同张角电极下的运动过



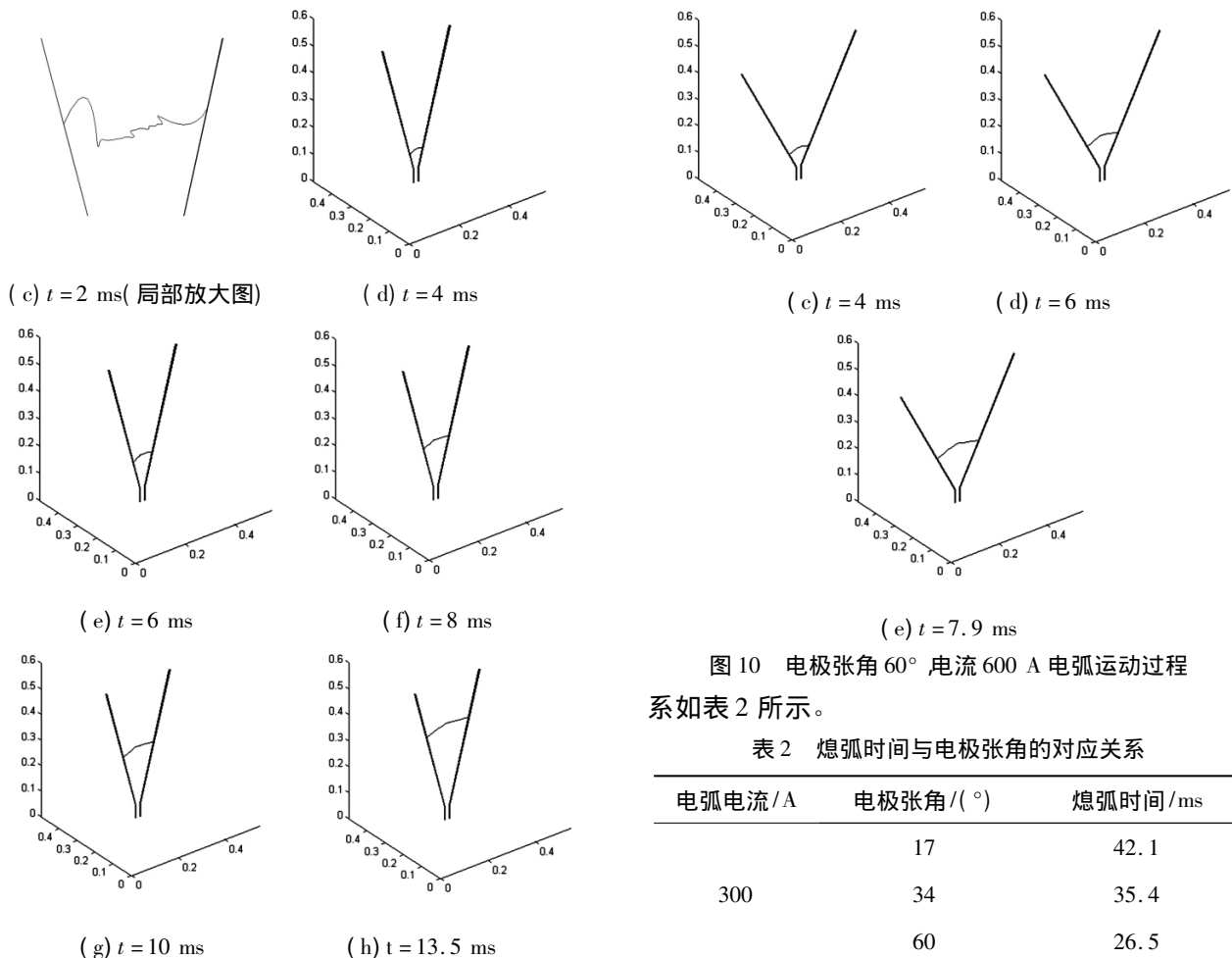


图9 电极张角 34° 电流 600 A 电弧运动过程

程进行仿真分析,在电极张角 34° 时的熄弧时间为 13.5 ms,在电极张角 60° 的熄弧时间为 7.9 ms。图 9、图 10 分别为电弧在 34° 及 60° 电极张角下的运动过程。

通过仿真分析,电极张角越大,电弧熄弧时所处的竖直高度越低,电弧更容易被拉长至熄弧长度,熄弧时间会越短。17° 张角的电极中电弧电流元爬升的最高位置是 0.587 8 m,34° 张角的电极中电弧电流元爬升的最高位置是 0.370 2 m,60° 张角的电极中电弧电流元爬升的最高位置是 0.220 1 m。对 300 A、400 A、500 A、600 A 电弧在不同张角电极的运动过程分析,得出仿真时间与电极张角的对应关

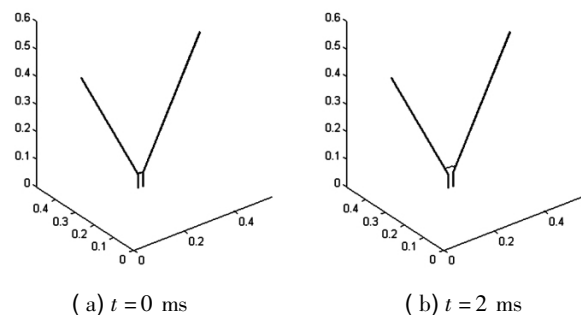


图 10 电极张角 60° 电流 600 A 电弧运动过程系如表 2 所示。

表 2 熄弧时间与电极张角的对应关系

电弧电流 / A	电极张角 / (°)	熄弧时间 / ms
300	17	42.1
	34	35.4
	60	26.5
400	17	25.3
	34	19.9
	60	14.4
500	17	22.2
	34	13.4
	60	7.8
600	17	21.6
	34	13.5
	60	7.9

图 11 为熄弧时间与电极张角对应的折线图。

直流电弧在电极根部起弧运动时,弧柱的形状较复杂,但是在电磁力、热浮力作用下,电弧向上运动过程中被拉长,呈圆拱形向上运动。

通过仿真发现电弧电流和电极张角是影响电弧运动的关键因素。电流越大,电弧向上爬升速度越快,熄弧时间越短。电极张角越大,电弧更容易被拉长至熄弧长度而更容易熄弧;但是电弧向上爬升的距离也变短,在实际中就是电弧在整个燃烧过程中

距电极根部绝缘子的距离短,绝缘子容易受到高温灼烧。因此在设计招弧角张角时需要综合考虑电弧电流大小和电极张角,既要使熄弧时间短,又要使电弧燃烧时不能距离绝缘子太短。

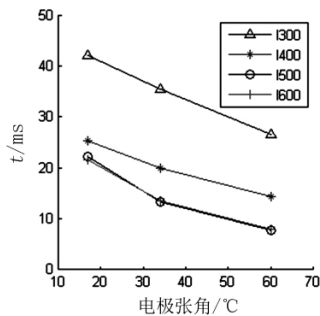


图 11 电极张角与熄弧时间对应关系

3 结 语

1) 建立了直流电弧在羊角型电极间运动的数学模型,其间考虑了在磁场力、热浮力和空气阻力作用下电弧的运动;并且考虑了不同电弧运动速度情况下电弧半径的不同导致热浮力的变化;同时考虑了不同电弧运动速度下的雷诺数与空气阻力系数的计算关系。

2) 通过仿真不同电流电弧运动过程,发现电流越大,电弧所受磁场力及热浮力越大,电弧更容易向上爬升拉长,电弧可以更快地发展到熄弧弧长,熄弧时间越短。

3) 同时仿真发现,当电极张角越大时,电弧被拉长的速度越快,熄弧时间越短。但是电极张角越大,电弧向上爬升的竖直距离越短,电弧距电极根部的距离短,在实际中就是电弧在燃烧时距绝缘子的距离较短,容易使绝缘子受到高温灼烧,所以在设计招弧角张角时需要综合考虑熄弧时间与电弧燃烧时距绝缘子的距离。

参考文献

[1] 徐志坚. 直流感地极招弧角熄弧能力研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.

[2] 陈志彬, 姜旭, 史宗谦, 等. 直流小电流下不同气体电弧的图像特性分析[J]. 高压电器, 2016, 52(12): 199-203.

[3] 王胜辉, 詹振宇, 陈维江, 等. 基于短间隙模型的直流输电线路极间短路电弧运动仿真研究[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2353-2359.

[4] Hertha Marks Ayrton. The Electric Arc [M]. Harpress Publishing, 2012.

[5] A. R. Van, C. Warrington. Reactance Relays Negligibly Affected by Arc Impedance [J]. ElectWorld, 1931, 98(12): 502-505.

[6] D. B. Millter, J. L. Hildenbrand. DC Arc Model Including Circuit Constraints [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1973, 92(6): 1926-1934.

[7] J. D. Cobins. Gaseous Conductors [M]. New York: McGraw-Hill, 1941: 371-378.

[8] V. P. Ignatko. Electric Characteristics of Open Heavy-current Arcs [C]. in Proc. 3rd Int. Symp. Switching Arc Phenom, 1977: 98-102.

[9] Shangqiang Gu, Jinliang He, Bo Zhang et al. Movement Simulation of Long Electric Arc Along the Surface of Insulator String in Free Air [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1359-1362.

[10] Stokes A D, Oppenlander W T. Electric Arcs in Open Air [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1991, 24(1): 26.

[11] 吴盛麟. 对我国输电线路工作的几点建议[J]. 电网技术, 1994, 18(2): 49-52.

[12] A. M. Cassie. Arc Rupture and Circuit Severity: A New Theory [R]. Paris, France, CIGRE Report, 1939.

[13] 王其平. 电器电弧理论 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1963.

[14] 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.

[15] 伍欣, 张卓, 杨诗怡. 输气管道摩阻系数计算方法 [J]. 计量技术, 2017(6): 10-15.

[16] 行晋源, 李庆民, 丛浩熏, 等. 半波长输电线路潜供电弧多场耦合的动力学建模研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2351-2359.

作者简介:

王 涛(1996) 硕士研究生, 研究方向为直流电弧运动模型与直流电弧试验;

郑连清(1964) 博士, 教授, 主要研究方向为电力电子技术, 技术在电力系统中的应用等。

(收稿日期: 2019-04-24)