

交流污闪电弧动态特征探究

贺博, 林辉, 符强

(西北工业大学自动化学院, 陕西省 西安市 710072)

Dynamic Characters Exploring of Flashover Arc for AC Contaminated Insulators

HE Bo, LIN Hui, FU Qiang

(College of automation, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Dynamic characters of flashover arc from contaminated insulators under AC impulse was studied through arc modeling and correlative theory based on artificial test and physics doctrine. Transitional trace of arc states during flashover development such as arc appearing, extending, getting critical state, shrinking, and distinguishing was built and radial prolongation and capacitance effect was introduced into existing dynamic model of flashover. On the base of works above, some dynamic rules of arc with flashover developing were discovered, interpreted and validated. The result shows that state-developing traces are not overlapped in arc extending and shrinking course; Radial prolongation and capacitance effect developed in this paper can enrich the existing model, which are helpful for advanced studying and modeling of flashover in the future.

KEY WORDS: flashover; modeling; dynamic arc

摘要: 通过将污闪电弧模型化,并结合有关污闪试验结论和物理学说,详细讨论了在交流冲击下,污闪电弧的动态特征。绘制了起弧、电弧延伸、临界态、电弧收缩、熄弧各状态之间的电弧状态发展轨迹,将径向延伸和“电容效应”引入了电弧动态方程。从而揭示了电弧发展过程中有关状态量的变化趋势和特征,并针对有关结论做了必要的解释和验证。结果表明:电弧的延伸和收缩状态轨迹不是重合的,考虑弧径延伸和“电容效应”能够弥补现有模型的不足。这对于进一步研究污闪机理,建立更加科学合理的污闪模型具有参考价值。

关键词: 污闪; 模型; 动态电弧

0 引言

在高压(HV)和超高压(UHV)输电等级下,绝缘子污秽闪络的危害已经远远超过了雷电冲击,成为对电网最具危害的因素^[1]。正确了解污闪机理事关

防污闪工作能否彻底得以解决,高压电网可靠性能否得到更有效的保证^[2],意义重大。

就污闪模型建立而言,Obenaus 串联模型^[3]得到了普遍认同^[4],以此为基础,发展了针对矩形平板模型、圆盘模型以及实际绝缘子污闪的静态模型和动态模型。静态模型可以计算污闪的临界条件,而动态模型可以解释污闪发展过程中电流、弧压等特征量的变化趋势^[5-6]。尽管所建模型大都基本吻合人工污秽试验数据,但模型彼此之间存在很大的分歧。究其原因,一方面是由于彼此试验条件不同导致了参数整定结果分散性很大,另一方面是因为模型相对简单,假设太多,模型本身并不能有效表征闪络,利用实测数据整定参数的过程使得模型和实测数据在某种程度上出现了一致性,或者说参数的确立过程在一定程度上掩盖了模型本身的缺陷。所以有必要结合相关的物理理论,详细探究污闪的物理过程,减少在模型建立过程中的假设,细化模型。

本文关注的是污闪发展过程中电弧的径向延伸,因为弧径一直是污闪建模领域的重要参数之一,关系到弧足大小及弧头弧足区域的电场分布,进而关系到电弧延伸因素的确立^[7],但该参数的求取均继承了经验公式^[8]。本文对电弧的径向延伸作了详细讨论,并结合成熟的电弧学说,探究了污闪发展过程中电弧的有关特性。

1 模型建立及讨论

1.1 模型建立

本文所建立的污闪电弧模型为圆柱状模型,主弧道由多个子弧道并联而成,如图1所示,图中 I_{arc} 表示电弧电流,图1等效的电路模型如图2所示,即将圆柱状电弧看作多个电阻($R_{arc1}, R_{arc2}, \dots, R_{arcn}$)的并联, U_{arc} 表示弧压降。文献[9-10]曾利用此模型

基金项目: 航空基金项目(04F53036)。

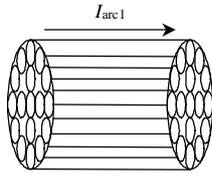


图1 电弧模型
Fig.1 Arc model

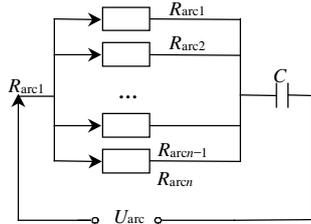


图2 电弧等效并联模型
Fig.2 Equivalent arc model in resistances parallel connection

讨论过高压断路器的电弧特性，并得到了比较合理的结论。文献[7]曾明确观测到了人工污秽试验中电弧除了沿轴向伸展外，沿径向也有明显的发展，并试验观测到了电弧场区沿径向具有梯度极大的温度场分布。

在图1、2电弧模型中，考虑到在电弧产生后，在电弧区域，由于正负带电离子在电场中移动速度不同，所以在电场中正负离子分别形成聚集，在电势大处负离子密度较大，在电势小处正离子密度较大，形成了类似电容被充电后的电荷分布状态，并且电弧半径越大，聚集电荷越多，“电容效应”越明显，本文模型中用 C 来表示这种“电容效应”，并认为电容 C 是弧径的函数，随弧径的变化而呈动态变化。通过 $R_{arc1}, R_{arc2}, \dots, R_{arcn}$ 的差异来体现弧区径向电流密度分布的不均匀。

1.2 电弧状态变化讨论

绝缘子污秽闪络过程不同于空气击穿，因为试验结果表明，污秽绝缘子的起弧场强要远小于空气的击穿电场^[1,4,11]。文献[7]也明确指出，污秽闪络的起因在于绝缘子表面受湿导致了泄漏电流不断增大，受表面状况影响，绝缘子表面泄漏电流密度分布不均匀导致了在电流密度较大处最先形成干带，干带因承受了很大的电压而电流密度剧增，从而导致了干带区温度急剧上升，所产生的高温致使低电离电位的元素被电离而产生了导电通路，并且测量了电弧区温度分布，结果表明，电弧区域的温度分布不是均匀的，由电弧轴线向外，温度呈下降趋势。结合相关物理理论^[4,12-13]，可得到以下结论：在靠近轴线处，温度较高，粒子易被电离，导致了带电

粒子分布密度比电弧边缘区域高，所以电弧轴线上具有最大的电流密度。

由于电弧轴线上具有最大的电流密度，由轴线向外，电流密度不断减小，正负离子的中和过程变得越来越弱，导致了弧光减弱。当电流密度小于某一临界值时，弧光将微弱到难以观察，弧径也由该临界值来界定。本文中，为了方便讨论，假定电流密度分布如图3所示。其中横坐标 r_a 为该点距轴心的距离，纵坐标为电流密度 j ，弧径为 r ，对应了电弧边界处的电流密度 j_1 ， j_0 为中轴线上的电流密度。

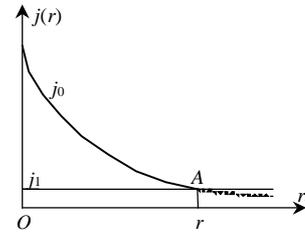


图3 电流密度沿径向的分布
Fig.3 Current density distributing in radial direction

通过电弧断面的电流大小为

$$I_{arc} = \int_s j(r_a) ds = \int_0^{2\pi} dq \int_0^r r_a j(r_a) dr_a \tag{1}$$

其中 s 为弧柱断面面积。
设

$$j(r_a) = \frac{j_0}{a^{r_a}} \quad (r_a \leq r) \tag{2}$$

其中 a 为常数。

在该电弧模型下， R_{arc} 为弧阻抗，如式(3)所示

$$I_{arc} = \frac{U_{arc}}{R_{arc}} \tag{3}$$

由式(1)~(3)可得

$$2\pi \int_0^r r_a j(r_a) dr_a = \frac{U_{arc}}{R_{arc}} \tag{4}$$

对式(4)两边求导

$$2\pi r j(r) \frac{dr}{dt} = \frac{1}{R_{arc}} \frac{dU_{arc}}{dt} - \frac{U_{arc}}{R_{arc}^2} \frac{dR_{arc}}{dt} \tag{5}$$

将式(2)代入式(5)，得：

$$\frac{2\pi r j_0}{a^r} \frac{dr}{dt} = \frac{1}{R_{arc}} \frac{dU_{arc}}{dt} - \frac{U_{arc}}{R_{arc}^2} \frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{1}{R_{arc}} \frac{dU_{arc}}{dt} + \frac{U_{arc} d(\frac{1}{R_{arc}})}{dt} \tag{6}$$

由于

$$U_{arc} = I_{arc} R_{arc} \tag{7}$$

所以

$$dR_{arc} = \frac{U_{arc} dI_{arc} - I_{arc} U_{arc}}{I_{arc}^2} \quad (8)$$

将式(7)、(8)代入式(6)并令 $dr/dt=0$ ，可得：

$$\frac{dU_{arc}}{U_{arc}} = \frac{U_{arc} dI_{arc} - I_{arc} dU_{arc}}{I_{arc}^2} \frac{I_{arc}}{U_{arc}} \quad (9)$$

$$I_{arc} dU_{arc} = U_{arc} dI_{arc} - I_{arc} dU_{arc} \quad (10)$$

$$U_{arc}^2 = kI_{arc} \quad (11)$$

其中 k 为常量，式(11)满足时， $dr/dt=0$ ，弧长保持恒定，参照污闪建立过程的已有规律，可以得到以下结论(边界条件)：

(1) 在起弧和熄弧时刻，无电弧存在，可以认为此时电弧已经产生，但弧径保持为零，本文称该时刻为第 1 临界点，遵循式(11)条件约束；

(2) 当污闪发展到一定状态后，受表面污层、电源电压等因素的制约，电弧注入能量和耗散能量要维持平衡，一旦平衡建立，电弧将停止延伸^[13]，此后，随电压的回落，电弧将开始收缩。本文称电弧发展和收缩的转折点为第 2 临界点，仍满足式(11)。

(3) 令式(5)右边为零，可知：

$$\frac{dU_{arc}}{U_{arc}} = \frac{dR_{arc}}{R_{arc}} \quad (12)$$

$$U_{arc} = k_1 R_{arc} \text{ 或 } R_{arc} = k_2 U_{arc} \quad (13)$$

$$k_1 = \frac{1}{k_2} = I'_{arc} \quad (14)$$

式(12)、(13)同样满足弧径保持不变的条件，其中 k_1 、 k_2 为常数，对上述一、二类临界点而言，分别对应了起弧电流和最大电流，其中起弧电流受表面污层状况影响比较大，最大电流主要受制于变压器容量^[11]，所以在整个污闪过程中，变量 k_1 、 k_2 是变化的量，可看作是状态参量。和 k_1 、 k_2 对应，式(11)中的 k 也是变动的，主要受污闪时刻绝缘子表面状况和电源影响，变化相对来说比较缓慢，因此，在较短的时间段内，可以认为该状态参量是常数。

同理令 $dr/dt > 0$ ，可知交流正半周期，电弧径向延伸的条件为：

$$\frac{dU_{arc}}{dI_{arc}} > \frac{1}{2} \frac{U_{arc}}{I_{arc}} \quad (dI_{arc} > 0) \quad (15)$$

$$\frac{dU_{arc}}{dI_{arc}} < \frac{1}{2} \frac{U_{arc}}{I_{arc}} \quad (dI_{arc} < 0) \quad (16)$$

电弧收缩的条件为

$$\frac{dU_{arc}}{dI_{arc}} < \frac{1}{2} \frac{U_{arc}}{I_{arc}} \quad (dI_{arc} > 0) \quad (17)$$

$$\frac{dU_{arc}}{dI_{arc}} > \frac{1}{2} \frac{U_{arc}}{I_{arc}} \quad (dI_{arc} < 0) \quad (18)$$

交流负半周期和正半周期具有对称性。

考虑图 2 中电容 C 的影响，由前面的讨论可知，该电容是呈动态变化的，和弧径有关系，所以假设

$$C = f(r) \quad (19)$$

1.3 电弧伏安特性讨论

图 4 是根据以上关系式所确定的弧压、弧电流的时变关系示意图。其中横坐标为弧电流，纵坐标为弧压。箭头表示时间，粗实线 II、III、IV、V、II₁、III₁、IV₁、V₁ 表示起弧状态；粗点线 I、VI、I₁、VI₁ 代表了熄弧状态；虚线 L₁、L₂、L₃、L₁₁、L₁₂、L₁₃ 为辅助线。熄弧状态无电弧存在，所以不具备图中的坐标意义，只是为了突出起弧、熄弧点不位于原点，为了使得整个状态过程比较完备且易于理解，熄弧阶段电弧的电阻等同于污层电阻。

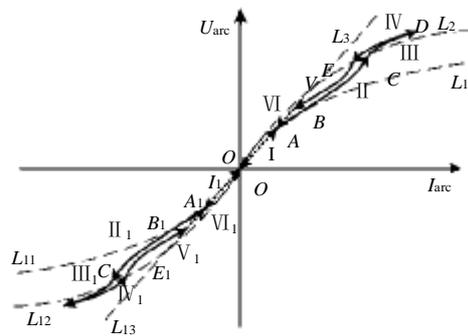


图 4 伏-安特性的状态

Fig.4 Variety of arc voltage vs arc current with time

第 I 段(O→A)：此时外施电压不满足起弧条件，绝缘子沿面无电弧产生，伏-安特性沿 L₃ 上升，L₃ 直线的斜率为电弧产生前污层的电阻，A 点为起弧点，对应了起弧电压和电流。由前面的讨论可知，起弧点受式(11)条件制约，所以 A 点为 L₃ 和 L₁ 的交点，L₁ 为受起弧状态参数 k 制约的式(11)的轨迹。

第 II 段(A→C)：此时外施电压正向增加，并且满足起弧条件，电弧产生并且延伸。由于电弧发展的条件是电弧区场强小于污层场强^[14]，在电弧发展过程中，泄漏电流的增加导致污层区电流密度增加，而污层的表面电导率变化很小，所以污层区的电场强度一直增加。电弧区的电场强度只要小于污层区场强，电弧将不断发展，直到两者值相等，电弧才停止延伸。所以随着电弧的发展，电弧的电场强度必然保持增加，由于弧长也保持增长，因此电

弧弧压必然保持增大。由于电弧要发展必须满足式(15),所以II在A点的切线斜率要大于 L_1 在A点的切线斜率。因此,II的轨迹为从A点开始,保持一定的斜率向着电压、电流增大的方向发展。

第III段(C→D):D点为II和 L_2 的交点,对应了第2临界状态点。C点在时间关系上先于D点。C点为D点前的状态点,该段其实是电弧到达第2临界点前不久的伏-安特性发展轨迹,该段电流增加明显加快,电阻快速减小,D点前电弧处于发展趋势,D点后电弧处于收缩趋势。

第IV段(D→E):该段和III段意义相同,趋势相反,该段为电弧收缩开始瞬间的状态轨迹。

第V段(E→B):按照式(18)的约束条件,在电弧收缩时,对应的伏-安特性将始于第2临界点,并沿较大的斜率向电压电流减小的方向发展。

第VI段(B→O):当V段不断发展,到达 L_3 上点B时,电弧完全熄灭。伏-安特性沿 L_3 下降。

考虑到“电容效应”,由于等效电容和正负离子的聚集有关系,故在电弧发展过程中,电容越来越大,并被正向充电,而在电弧熄灭过程中,电容处于放电状态,按照电容电压不能突变的理论,将电容等效成一电压源,按照图2所示的电路连接关系,可知,在充电时,由于电容的接入,和无电容相比,相同的 U_{arc} 作用下,能产生更大的泄漏电流。在放电状态,和无电容电路相比,由于电容的接入,在相同的电流流过时, U_{arc} 具有较大的伏值。导致绘制图4时,电弧发展轨迹位于收缩轨迹的下方,并直接导致起弧电流、电压要小于熄弧电流、电压。

在图4中,I和VI段均为无电弧的状态,但该段存在电弧参数(R_{arc} 、 U_{arc} 、 I_{arc}),这是因为,就目前的污闪建模而言,工频过零点附近均存在熄弧,熄弧和起弧瞬间在仿真过程中会存在赋初值的问题,而该初值通常不能选择为零,否则会出现某些状态量对时间的导数为零,以致无法迭带的问题。作者的仿真经验是要通过反复试探确定电弧参数,但最常见的仿真报道均是只产生泄漏电流,而对于其它的状态量如 R_{arc} 、 U_{arc} 、 L_{arc} 、 R_{arc} 讨论甚少。所以图4中,无弧段(I、VI段)具有非零电弧参数。

图4的第3向限为交流负半周期的状态变化曲线。

2 结果合理性分析及验证

本文在建模过程中将电弧看成电阻的并联(如

图2所示),所有的电阻支路承受了相同的电压,由于阻值的不同而具有不同的支路电流,通过支路电流变化来体现电弧截面层不同位置的电流密度分布。这和目前得到认同的污闪串联模型是统一的,因为当污闪电弧产生时,电弧成为了电路的一部分,尽管电弧的弧压、弧阻是时变的,但在瞬时,它们之间仍然满足式(3)的电压电流方程,否则,电弧模型将和电压电流定律相违背,也将不能再被纳入串联电路模型来讨论,这将违背已获得公认的污闪串联模型。所以本文的出发点是具有合理性的。此外,本文的推理过程还基于了以下假设:电弧截面的电流分布不是统一的,靠近中轴线的电流密度较电弧边沿的电流密度要大^[15];电弧的延伸和电流的增加是同步的,当电流增加时,电弧将实现纵向和横向的延伸^[16]。

(1) 物理角度解释。

在污闪试验中,随着试品表面污层的受湿,表面电导不断增大,导致泄漏电流的增大,由于试品表面受污不均和形状的影响,在电流密度大的地方,发热非常大,从而造成了干带的快速形成,当干带形成以后,随着试品电压的增加,干带区承受了很大的电压,同时该区域场强剧增^[17-18]。尽管目前对于起弧的原因是因为该区域场强击穿还是因为发热引起盐分被电离还存在争论,但这只关系到带电离子的产生。随着电压的增加,电弧区的场强会增加,带电离子的密度会增加,由于正负带电离子在电场中扩散的速度不同,会造成正负离子分区聚集,由于相同电性的排斥力增加会导致离子向周围进一步扩散^[15],而离子聚积区域的中和放电是导致弧光产生的因素,即离子聚集区域增加必导致弧径增加。关于正负离子体的分区聚集完全可以通过正负极压降来解释。同时电弧的径向延伸不是无限的,一方面是因为正负离子会受到电力线方向的制约,另外,随着弧径的延伸和扩展,电弧表面积增加,电弧向四周的能量耗散也将大大增加,而对于试验而言,电源的容量不是无穷大的,泄漏电流的增加也不可能无穷大,当电流大到一定程度时,电源输出电压将会下降,以上因素均会制约弧径的延伸,当导致电弧扩展的因素和制约因素平衡时,电弧将停止扩展。同时靠近中轴线上温度最高^[19],弧光最强,所以二次激发要明显比边沿区域激烈^[13,20],所以有理由认为电流密度的分布不是均匀的,靠近轴线上的电流密度要大于边沿区域的电流密度。

(2) 和经验公式的关系讨论。

本文模型中关于弧径模型和目前得到认可并被大量用于研究的弧径计算经验公式是统一的，经验公式只是本文弧径模型的进一步简化，可看作是本文模型的一个特例。

假定电流密度为常数，即

$$j(r_a) = N \tag{20}$$

代入式(1)

$$I_{arc} = \int_s j(r_a) ds = \int_0^{2\pi} dq \int_0^r r_a j(r_a) dr_a = \int_0^{2\pi} dq \int_0^r r_a N dr_a = k\pi r^2 \tag{21}$$

$$r = \sqrt{\frac{|I_{arc}|}{N\pi}} \tag{22}$$

重写经验公式^[7]

$$r = \sqrt{\frac{|I_{arc}|}{1.45\pi}} \tag{23}$$

可见经验公式正是建立在将电弧看作圆柱状并假设弧电流密度是均匀分布的基础上的，这说明本文正是经验公式的推广。而通过前面的分析，可知本文较之经验公式更具合理性。

(3) 试验数据验证。

图 5、图 6 为文献[21]中实测得到的电弧电压、泄漏电流随时间的波形变化，2 图在时间上保持同步。由图 6 可知，此时泄漏电流峰值持续增长，污闪处于发展阶段，在交流周波过零点，存在明显的熄弧。将 2 图对比，不难发现熄弧电压均明显高于起弧电压，该结论与前述模型下伏-安特性的分析结论吻合。

图 7 为考虑了弧径延伸和电容效应后所得到的电弧电压仿真结果，仿真条件为将式(19)弧径和电容的关系看作比例平方关系，如式(24)所示，并结合现有的污闪动态模型建模仿真。

$$C = mr^2 \tag{24}$$

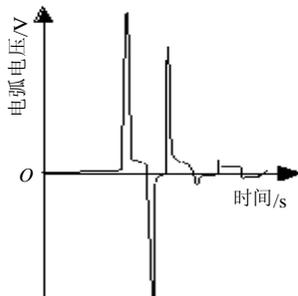


图 5 电弧电压示波图

Fig.5 Oscilloscope of arc voltage from test

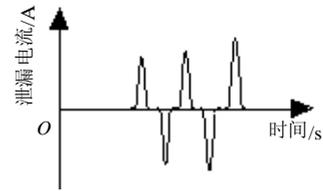


图 6 泄漏电流示波图

Fig.6 Oscilloscope of leakage current from test

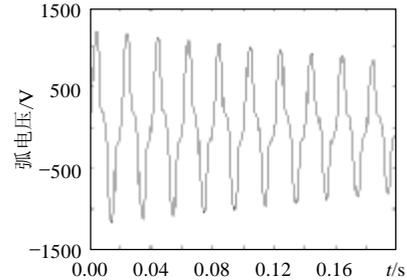


图 7 电弧电压仿真结果

Fig.7 Simulation results of arc voltage

由图 7 可知，在考虑了弧径延伸和电容效应后，仿真得到的起弧电压要明显高于熄弧电压，与文献[21]的实测结论吻合，从而弥补了目前污闪动态模型起弧熄弧电压相等所表现出的不足。

3 结论

本文针对目前电弧动态模型的不足，将电弧径向变化作为考虑因素，并结合电弧断面内电流密度分布不均的特点通过合理的物理模型近似，发展了电弧的径向延伸方程；针对电弧燃烧状态下，正负离子分散聚集的特点，引入了“电容效应”的概念，并通过分析给出了动态电容的表达方程；通过对弧径延伸的讨论并结合公认的电弧物理学说绘制了电弧起弧、延伸、缩弧以及熄弧状态下的伏-安特性变化轨迹，通过对伏-安曲线的讨论，发现电弧的起弧状态轨迹和熄弧状态轨迹不是重合的，合理地解释了交流电弧发展过程中，起弧电压低于熄弧电压的现象。通过在现有的污闪动态模型中加入电弧径向方程和动态电容方程并建模仿真，得到了起弧电压低于熄弧电压的仿真结果，弥补了现有模型下起弧电压等于熄弧电压的不足，在趋势上吻合实测数据；分析了弧径计算经验公式和本文弧径公式的关系，分析结果表明，经验公式是建立在对本文公式作进一步假设基础上的，所以本文弧径公式较之经验公式更加丰富，也更加合理。

本文针对的是交流污闪，但其结果也同样适合于直流电压反复变化情况下的污闪模型。

参考文献

- [1] 梁曦东, 陈昌渔, 周远翔, 等. 高电压工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 75-84.
- [2] 汪涛, 欧其和, 吴江宏, 等. 用盐密指导高压输电线路清扫的试验研究[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 22-26.
Wang Tao, Ou Qihe, Wu Jianghong, et al. Test And research on cleaning of high voltage transmission line based on salt density [J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 22-26(in Chinese).
- [3] Ghosh P S, Chatterjee N. Polluted insulator flashover model for ac voltage[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(1): 128-135.
- [4] 杨保初. 高电压技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002: 57-94.
- [5] Rizk F A M. Mathematical model for pollution flashover[J]. Electra, 1981, 78(5): 71-103.
- [6] Sundararajan R, Gorur R S. Dynamic arc modeling of DC flashover under contaminated conditions[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1993, 2(6): 562-566.
- [7] 李顺元. 交流电压下污染绝缘表面闪络机理的研究[D]. 北京: 清华大学, 1988: 47-52.
Li Shunyun. The mechanism of the flashover on a polluted dielectric surface under ac voltage[D]. Peking: Tsinghua University, 1988: 47-52(in Chinese).
- [8] Wilkins R. Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films[J]. IEEE, 1969, 116(3): 457-465.
- [9] 刘晓明, 王尔智, 曹云东. 高压 SF₆ 断路器电弧动态模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 102-106.
Liu Xiaoming, Wang Erzhi, Cao Yundong. Study on dynamical arc model on high voltage SF₆ current breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 102-106(in Chinese).
- [10] 曹云东, 刘晓明, 王尔智. 能量流电弧模型及 SF₆ 断路器在短路开断下的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 93-97
Cao Yundong, Liu Xiaoming, Wang Erzhi. Energy flow arc modeling and appliend nvestigation in short current interrupting for sf₆ current breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 93-97(in Chinese).
- [11] 中野义映. 高电压技术[M]. 张乔根, 译. 北京: 科学出版社, 2004: 17-48.
- [12] 王立军, 贾申利, 史宗谦, 等. 真空电弧磁流体动力学模型与仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 113-118.
Wang Lijun, Jia Shenli, Shi Zongqian, et al. MHD model and simulation research of vacuum arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 113-118(in Chinese).
- [13] 过增元, 赵文华. 电弧和热等离子体[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 3-16.
- [14] 丁立健, 李成裕, 王景春. 真空中绝缘子沿面预闪络现象的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 29-32.
Ding Lijian, Li Chengrong, Wang Jingchun. Study on pre flashover of alumina insulator in vacuum[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 29-32(in Chinese).
- [15] 张晋, 陈德桂, 付军. 低压断路器灭弧室中磁驱电弧的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 22-25.
Zhang Jin, Chen Degui, Fu Jun. Mathematical model of magnetic field driven arc in arc chamber of low voltage circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(10): 22-25(in Chinese).
- [16] 修士新, 金黎, 王季梅. 大电流真空电弧特性的研究与仿真[J]. 电网技术, 1997, 21(6): 29-36.
Xiu Shixin, Jin Li, Wang Jimei. Measurement and research on high current vacuum arc[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 21(6): 29-36(in Chinese).
- [17] Gorur R S. Sudden flashover of insulators in articial contamination tests[J]. IEEE Trans. on on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 1(4): 79-87.
- [18] Felix A. Electric transmission line flashover prediction system [D]. Tempe, Arizona: Arizona state university, 2001: 30-100.
- [19] 赵子玉, 武建文, 邹积岩, 等. 利用 CCD 摄像系统研究真空电弧演变过程[J]. 中国电机工程学报, 1999, 9(11): 11-13.
Zhao Ziyu, Wu Jianwen, Zou Jiyan, et al. Observation of vacuum arc mode transition using ccd camera system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(11): 11-13(in Chinese).
- [20] Vitelli M, Tucci V, Petrarca C. Temperature distribution along an outdoor insulator subjected to different pollution levels[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(3): 416-423.
- [21] 关志成. 在交、直流电压下污染绝缘子闪络条件的分析计算和试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1984, 76-79.
Guan Z C. Analysis, Calculation and Testing method study of flashover conditions of contaminated insulator with AC and DC voltage[D]. Peking: Tsinghua University, 1984: 76-79(in Chinese).

收稿日期: 2006-05-09。

作者简介:

贺 博(1976—), 男, 博士研究生, 研究方向为污闪检测及识别, hhebo@163.com;

林 辉(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代电力电子;

符 强(1978—), 男, 博士研究生, 研究方向为检测技术及自动化装置。

(编辑 车德竞)