

基于面积效应的真空灭弧室触头间隙击穿特性研究

程少勇, 刘志远, 李新华, 王季梅

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

Investigation on Breakdown Characteristics in Contact Gap for Vacuum
Interruption Based on Area Effect

CHENG Shao-yong, LIU Zhi-yuan, LI Xin-hua, WANG Ji-mei

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 针对一种中压真空灭弧室模型, 研究开距变化时触头有效面积对击穿电场强度的影响。通过电场仿真计算得到了开距对触头间隙内有效面积的影响; 通过冲击耐压试验得到了开距与击穿电场强度之间的关系。在此基础上发现在不同的开距范围内, 触头间隙内的有效面积对击穿电场强度的影响不同: 在开距 1~2 mm 范围内击穿电场强度 E_{bd} 随着触头有效面积 S_e 的增大而增加; 在开距 2~6 mm 范围内击穿电场强度 E_{bd} 随着触头有效面积 S_e 的增大而减小。

关键词: 面积效应; 绝缘强度; 真空灭弧室

中图分类号: TM241

文献标识码: A

Abstract: In this paper, the objective was to study the influence of effective area of the gap on the breakdown electric field strength for a medium voltage vacuum interrupter prototype. The influence of contact separation on effective area in the gap was obtained by electric field simulation. The relationship between contact separation and breakdown electric field strength was obtained by lightning impulse voltage experiments. Based on the mentioned results, it is found that the influence of effective area of the gap on breakdown strength is different for different range of the gap. In the range of gap with 1mm to 2mm, the breakdown electric field strength increases with the increase of effective area. In the range of the gap with 2mm to 6mm, the breakdown electric field strength decreases with increase of effective area.

Key words: area effect; dielectric strength;
vacuum interrupter

0 引言

真空灭弧室的触头间隙击穿特性存在面积效应^[1], 即随着有效面积的增加, 真空间隙的击穿电场强度降低。国外关于真空击穿有效面积的研究始于

20世纪80年代。从文[1-4]的实验中发现, 击穿部位出现在电场强度大于90%最大电场强度的区域内, 因此将这个区域定义为有效面积。电极表面状况包括触头表面的微突起、触头表面的微观结构和污染物等^[1-4]都会影响触头间隙的绝缘强度, 这些因素都反映了面积效应对触头间隙内的绝缘强度有显著影响, 即: 随着有效面积的增加触头间隙内的击穿电场强度减小。因此在对真空灭弧室进行绝缘设计时有必要考虑面积效应对绝缘强度的影响。找到触头间隙的击穿电场强度与触头的有效面积之间的定量关系对真空灭弧室触头间隙的绝缘设计有重要意义。

文[1]指出击穿电场强度与有效面积的关系符合 $E_{bd}=K_s S_e^{-1/m}$ 的形式。其中参数 K_s 和 m 与触头材料、触头形状等因素有关。尽管在特定的均匀电场分布和不均匀电场分布情况下已经得到了触头材料为铜和不锈钢的有效面积与击穿电场强度之间的定量关系^[1], 但是触头材料和触头形状的改变都会导致系数 K_s 和 m 出现变化, 进而影响有效面积和击穿电场强度之间的定量关系。

一般可以通过两种途径改变触头间隙的有效面积: ①保持触头之间的开距不变, 改变触头的表面轮廓; ②改变触头的开距, 而保持触头表面轮廓不变。笔者采用第2种方式来改变触头间隙的有效面积。对每个开距下的电场分布情况加以数值计算, 根据有效面积的定义, 可以得到每个开距下的有效面积。通过在每个开距下进行多次冲击耐压试验得到该开距下的平均击穿电场强度, 从而利用开距这个中间参量得到每个开距下的有效面积所对应的平均击穿电场强度, 进而得到有效面积对平均击穿电场强度的影响。笔者研究阴极表面的有效面积对击穿电场强度的影响, 因为真空间隙的击穿都是由阴极的场

致发射或者阴极表面附着的微粒引起的, 所以选择计算阴极表面的有效面积。

笔者通过对一种中压真空灭弧室模型进行冲击耐压试验和电场数值计算, 研究该中压真空灭弧室模型触头间隙内的有效面积对击穿电场强度的影响。

1 试验安排

图 1 所示为一种中压真空灭弧室模型内部结构的剖面图。屏蔽罩中封结构, 硅橡胶外壳, 触头材料为 CuCr 铁触头材料, 触头直径为 35 mm, 触头片厚度为 3 mm。图中左侧为静触头, 右侧为动触头, 在动触头的背面添加了均压环。共设置了 3 个屏蔽罩, 一个为主屏蔽罩, 另外两个为动、静触头的端屏蔽罩。

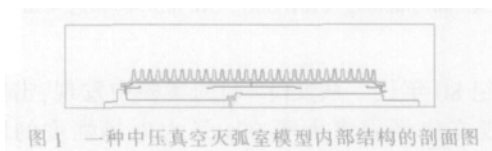
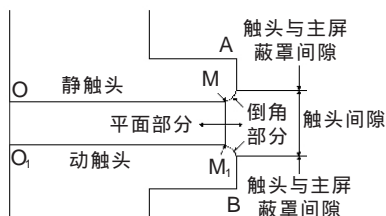


图 1 一种中压真空灭弧室模型内部结构的剖面图

触头间隙部分见图 2, 由平面部分和倒角部分组成。触头平面部分直径为 33 mm; 倒角部分为一个 1/4 圆弧, 其半径为 1 mm。



O_1M_1 、 OM ——分别为动、静触头平面部分半径
 O_1B 、 OA ——分别为动、静触头外轮廓线

图 2 触头间隙结构示意图

冲击电压发生器的额定输出电压为 1.2/50 μ s 的标准雷电冲击波, 峰值为 600 kV, 额定容量为 3 kJ, 级数为 6 级。电容分压器高压臂电容为 300 pF, 分压比为 1 000 1。

通过对真空灭弧室内电场分布情况的计算发现: 当开距在 6 mm 以内时, 最大电场强度都出现在触头间隙内的倒角部分, 击穿发生在触头间隙; 当开距超过 6 mm 时, 出现最大电场强度的位置转移到触头与屏蔽罩间隙内的 A 点上, 此时击穿出现在触头与屏蔽罩间隙内。鉴于笔者的研究范畴为触头间隙的击穿特性, 希望最大电场强度出现的位置在触头间隙内, 因此不考虑开距大于 6 mm 的情况, 开距变化范围为 1~6 mm。在每个开距下, 对试样各进行 100 次以上的冲击耐压测试, 两次试验之间的时间间隔在 30 s 以上。

2 研究结果

2.1 电场分析

对该中压真空灭弧室模型的静态电场分布进行

了计算。电场计算使用 Maxwell 2D 电磁场计算软件, 采用有限元法、自适应网格剖分技术进行电场计算, 计算精度在 1% 以内。整个场域边界设为气球边界条件, 所谓气球边界条件是假设求解区域无限大, 在无限远处电位为零。在计算过程中, 静触头设为高电位 1 000 V, 为阳极触头; 动触头设为地电位 0 V, 为阴极触头; 中间屏蔽罩设为悬浮电位。

图 3(a) 为开距等于 1 mm 时真空灭弧室内部电场分布情况, C 区域即为触头间隙区域。图 3(b) 为触头间隙以及触头与主屏蔽罩之间区域的局部放大图。图 4(a) 所示为开距等于 1 mm 时真空灭弧室内部触头间隙及其附近区域的电场分布情况, 图 4(b) 为触头间隙的倒角部分区域的电场分布情况的局部放大图。图 3 及图 4 以颜色深浅来区分具有不同电场强度的区域, 每个图中左侧图例标志了不同颜色所对应的不同电场强度区域, 可以帮助观察、区分电场强度的分布情况, 其中所列数值为电场强度不同的区域之间的分界电场强度值, 颜色由浅入深表示电场强度逐渐减小。从图 4 可以看到, 阳极触头倒角部分的 E 区域的电场强度最大, 在 1 124.5 kV/m 以上; 整个触头间隙内的最大电场强度也出现在该区域, 为 1 127.9 kV/m; 触头间隙平面部分的电场强度在 899.58 kV/m 以上。阴极触头表面上的最大电场强度也出现在其倒角部分上的 E_1 区域。

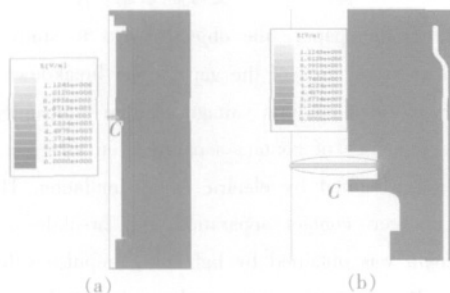


图 3 开距为 1 mm 时的真空灭弧室内部电场强度的分布情况

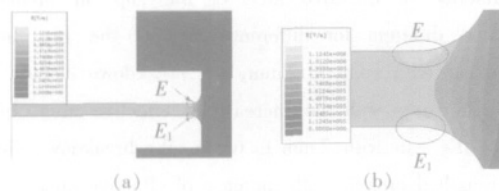
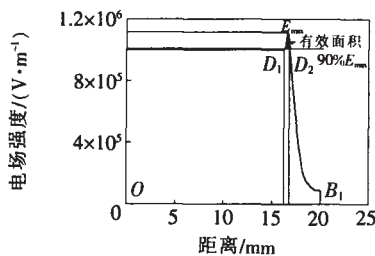


图 4 开距为 1 mm 时触头间隙及其附近区域的电场分布情况

开距为 1 mm 时, 电场强度沿图 2 中阴极触头轮廓 O_1B 的分布情况见图 5。图中阴影部分即为有效面积分布区域。通过电磁场软件计算可以得到阴极触头轮廓 O_1B 上的最大电场强度为 1 112.2 kV/m, 且出现在阴极触头的倒角上。有效面积在 $D_1 \sim D_2$ 之间, 通过电磁场软件计算可以得到 D_1 和 D_2 所对应的坐标和此位置的电场强度值以及有效面积分布的区域, 再根据有效面积区域的边界点 D_1 和 D_2 的位置可以判断出有效面积的空间分布状况, 进而计算出

有效面积的大小。如图2所示,因为触头平面部分半径 O_1M_1 为 16.5 mm, 当开距为 1 mm 时, D_1 的径向坐标 x 小于 O_1M_1 , 因而可以判断出 D_1 在触头平面部分; 类似的 D_2 的径向坐标值 x 大于 O_1M_1 , 因而此点在触头的倒角上, 所以此时阴极触头表面的有效面积由触头平面部分的圆环面积和触头倒角部分的旋转体侧面积组成。触头平面部分的圆环面积为半径为 O_1M_1 的大圆和以 D_1 的径向坐标为半径的小圆之间的圆环面积, 可由公式 $S = (R^2 - r^2)$ 计算得到, 其中 R 为 O_1M_1 , r 为 D_1 的径向半径。触头倒角部分的有效面积是由触头倒角部分在 xoz 平面上的外轮廓曲线绕 z 轴旋转而成的旋转体的侧面积, 可用公式 $S = 2 \int_a^b f(z) \sqrt{1+[f'(z)]^2} dz$ 计算得到, 其中 a 和 b 为旋转体侧面在 z 轴上的定义区域, 在文中 a 和 b 为触头间隙倒角部分边界点在 z 轴上的定义域; $f(z)$ 为触头倒角部分在 xoz 平面上的外轮廓曲线的函数表达式; $[f'(z)]^2$ 为该外轮廓曲线函数对 z 的微分的平方。



注: D_1, D_2 为阴极触头表面90%最大电场强度的边界点; 阴影区域为有效面积。

图5 电场强度沿图2中上触头轮廓 OB 的分布情况

触头间隙内平面部分的有效面积随开距的变化关系见图6。从图6可以看出, 当开距从 1 mm 增加到 2 mm 时, 触头间隙平面部分的有效面积从 61.22 mm² 迅速减小到 8.86 mm²; 当开距从 2 mm 增加到 3 mm 时, 触头间隙平面部分的有效面积从 8.86 mm² 减小到 0 mm²; 当开距增加到 3 mm 以上时, 触头间隙平面部分的有效面积始终为 0, 即有效面积不再出现在触头间隙内的平面部分。

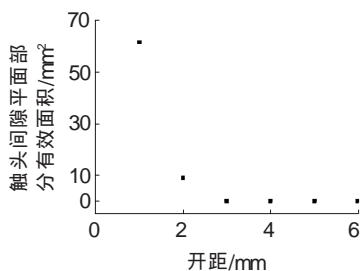


图6 开距与触头平面部分有效面积之间的关系

触头间隙内倒角部分的有效面积随开距的变化关系见图7。从图7可看出, 随着开距从 1 mm 增加到 6 mm, 触头间隙倒角部分的有效面积从 37.29 mm² 逐渐增加到 78.71 mm²。

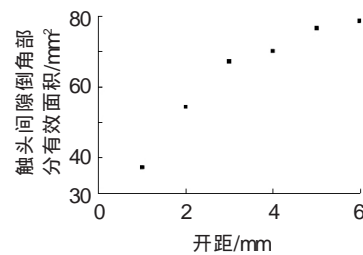


图7 开距与触头倒角部分有效面积之间的关系

触头间隙内的有效面积由平面部分的有效面积和倒角部分的有效面积组成, 图8为触头间隙内的有效面积随开距的变化情况。从图8可看出, 开距从 1 mm 增加到 2 mm 时, 触头间隙内的有效面积从 98.51 mm² 迅速减小到 63.23 mm²; 当开距增加到 3 mm 时, 触头间隙内的有效面积增加到 67.26 mm²; 当触头之间的开距从 3 mm 增加到 6 mm 时, 触头间隙内的有效面积开始逐渐增加, 从 3 mm 时的 67.26 mm² 增加到 6 mm 时的 78.71 mm²。

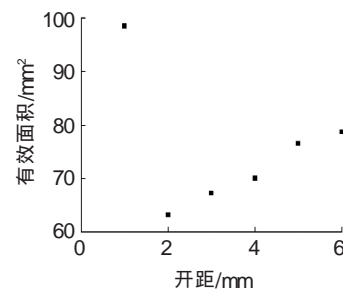


图8 触头间隙的有效面积与开距之间的关系

触头间隙内的有效面积随着开距的增加而先减小再增加的情况, 是触头间隙内平面部分的有效面积和倒角部分的有效面积随开距变化情况的一个综合反映。

2.2 冲击耐压试验结果

对图1所示中压真空灭弧室模型分别在开距为 1、2、3、4、5、6 mm 的条件下各进行 100 次冲击耐压试验。当对试品施加标准雷电冲击电压时, 如果发生击穿则在下一次试验时降低施加在试品上的雷电冲击电压峰值, 如果没有发生击穿则提高施加在试品上的雷电冲击电压峰值。在未击穿情况下, 击穿电压取标准雷电冲击电压峰值; 在击穿的情况下, 当击穿发生在波头时取实际击穿值, 当击穿发生在波尾时取标准雷电冲击电压的峰值。每个开距下的击穿电场强度是所有发生击穿时的击穿电场强度的平均值^[1-4], 即平均击穿电场强度。

试验过程中的典型的试验次数与击穿电压之间关系的分布情况见图9。该图是在开距为 1 mm, 有效面积为 98.51 mm² 的条件下得到的。由图9可以看到所有发生击穿时的击穿电压都在 99.65 ~ 140.12 kV, 其平均值为 117.81 kV。

图10为平均击穿电场强度随开距的变化情况。由图10可见, 随着开距增加, 平均击穿电场强

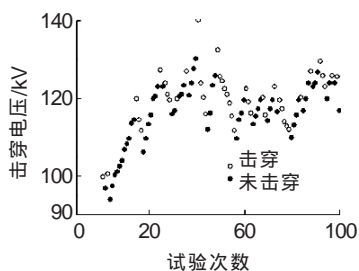


图9 开距1mm时试验次数与击穿电压之间的关系

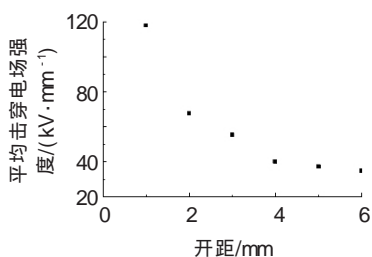


图10 平均击穿电场强度与触头开距之间的关系

度减小。平均击穿电场强度由1mm开距时的117.81 kV/mm下降到6mm开距下的34.97 kV/mm。

2.3 触头间隙内有效面积与击穿电场强度之间的关系

表1为不同开距下的有效面积和平均击穿电场强度的情况。从表中可以看出有效面积随着开距的增大先减小再增加，开距为2mm时有效面积最小。而平均击穿电场强度随着开距的增加单调减小。所以在开距1~2mm和2~6mm两个不同范围内，触头间隙内有效面积对击穿电场强度的影响不同。

表1 不同开距下的有效面积和平均击穿电场强度

开距/mm	有效面积/mm ²	平均击穿电场强度/(kV·mm ⁻¹)
1	98.51	117.81
2	63.23	67.66
3	67.26	55.36
4	70.06	40.12
5	76.54	37.37
6	78.71	34.97

由表1可知，当开距从1mm增加到2mm时，触头间隙内的有效面积从98.51 mm²减小到63.23 mm²，平均击穿电场强度由117.81 kV/mm减小到67.66 kV/mm，即：随着有效面积的增加，平均击穿电场强度也随之增加。这与文[1-4]的研究结果不同。具体的分布情况见图11。

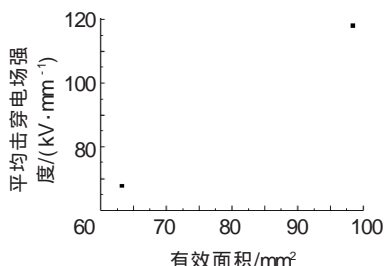


图11 开距1~2mm范围内有效面积与平均击穿电场强度之间的关系

由表1还可见，当开距从2mm增加到6mm时，触头间隙内的有效面积从63.23 mm²增加到78.71 mm²，平均击穿电场强度由67.66 kV/mm减小到34.97 kV/mm，即：平均击穿电场强度随着有效面积的增加而减小。具体的分布情况见图12。

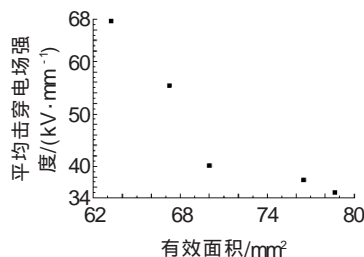


图12 开距2~6mm范围内有效面积与平均击穿电场强度之间的关系

3 结果分析

根据研究结果可以看到，有效面积对击穿电场强度的影响并不总是满足 $E_{bd}=K_s S_b^{-1/m}$ 所示的关系，即：随着有效面积的增加，击穿电场强度降低。在该研究当中这一规律只在开距2~6mm的范围内成立。在开距1~2mm的范围内，随着有效面积的增加，击穿电场强度亦增加。因此关于有效面积对击穿电场强度的影响还需要深入研究。

另外在真空灭弧室的绝缘设计当中，应该区分间隙考虑有效面积的影响。例如：触头间隙内的有效面积只对该间隙的绝缘特性有影响，而对于触头与屏蔽罩间隙等其它间隙的绝缘特性并没有影响。同样的，触头与屏蔽罩间隙内的有效面积只对触头与屏蔽罩间隙的绝缘特性有影响。

真空击穿与表面状况、开距以及加工工艺等诸多因素有关。从本质上说，真空间隙的绝缘击穿过程是一个随机过程，击穿的引发和发展受到许多随机因素的影响^[5,6]，因此需要深入研究面积效应对真空击穿影响的物理机理，这对建立更加精确的体现有效面积与击穿电场强度之间定量关系的数学模型也是必要的。

4 结语

对一种中压真空灭弧室模型进行了电场数值计算和冲击耐压试验。发现随着开距从1mm增加到2mm，触头间隙的有效面积从98.51 mm²减小到63.23 mm²；触头间隙内的击穿电场强度从117.81 kV/mm减小到67.66 kV/mm，即：随着有效面积的增加，触头间隙内的平均击穿电场强度也随之增加。而后在开距从2mm增加到6mm时，有效面积由63.23 mm²增加到78.71 mm²；触头间隙内的击穿电场强度从67.66 kV/mm减小到34.97 kV/mm，即：随着有效面积的增加，触头间隙内的平均 (下转第168页)

小, 模块之间的连接非常牢靠, 且无需底板和机箱;
④功能非常强大。PC/104 系列模块有 CPU 卡、显卡、
通讯及计数/定时器卡、数据采集卡、数字量输入/输
出卡、网卡等等, 几乎包括所有用户所需的模块; ⑤功
耗小, 模块化, 抗冲击及震动能力强, 工作及存储温
度范围宽; ⑥集成度高, 可靠性高。

图 6 为自动补偿消弧装置控制器的硬件结构框图。该装置由 PC/104 嵌入式 CPU 模板 (AX10401A)、48 位数字输入输出 (PI/O) 模块 (AX10420)、高速数据采集模板 (AX10410)、模拟量输入调理板、开关量输入输出调理板、继电器输出板、液晶显示器、键盘、微型打印机等构成。采用模块化设计, 全数字化处理技术及光电隔离技术, 其性能稳定、抗干扰能力强、可靠性高。控制器在自动运行方式下, 首先判断系统是否发生单相接地故障, 在确认系统没有发生单相接地故障的前提下, 进入自动跟踪补偿程序。在自动跟踪补偿过程中, 系统首先判断消弧线圈处于分列还是并列运行方式, 然后通过读取测量得到的系统线电压、中性点电流, 计算出系统的对地电容电流, 据此来调节消弧线圈。

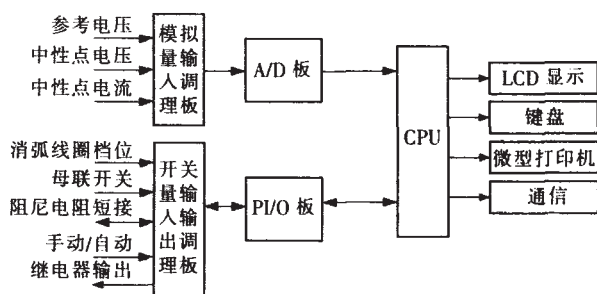


图 6 控制器硬件结构框图

笔者研制的自动补偿消弧装置控制器已经进行挂网运行, 在运行方式和出线发生改变时, 装置能够

准确地跟踪测量精度在 2% 以内。接地发生时, 能够快速输出补偿电流, 补偿后的残流小于 5 A, 效果令人满意。

4 结语

自动补偿消弧装置的应用使谐振接地方式的优点得到充分发挥, 其技术核心就在于对电网对地电容电流的准确跟踪和精确测量。针对目前电容电流检测方法的局限性, 考虑系统阻尼率的影响, 提出了一种新的测控方法。该方法通过改变消弧线圈的感抗, 测量两组中性点电压和电流的数值和相位, 推导出计算电容电流的两点算法。在系统正常运行时, 不调节消弧线圈感抗, 通过实时检测中性点电流, 计算出电网运行方式改变引起的对地电容的变化, 以获得最佳的补偿效果。在此基础上, 进一步得到两台消弧线圈并联运行时的测控方法。

根据提出的新型测控方法, 研制了以 PC/104 工业控制计算机为核心的自动补偿消弧装置控制器。该控制器在低压模拟电网上进行试验测试, 结果表明笔者提出的新型测控方法可以明显提高电网对地电容电流的测量精度, 达到了电力行业相关标准的要求, 可进一步推广到电力系统中应用。

参考文献:

- [1] DL/T 620-1997. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [2] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [3] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [4] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

(上接第 164 页)

击穿电场强度减小。这说明击穿电场强度随有效面积增加而减小的规律可能存在一定的适用范围。

参考文献:

- [1] OKAWA M, SHIOIRI T, OKUBO H, et al. Area Effect on Electrical Breakdown of Copper and Stainless in Vacuum[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 23(1): 77-81.
- [2] KATO K, X HAN X, OKUBO H. Insulation Optimization by Electrode Contour Modification Based on Breakdown Area/Volume Effects [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(2): 162-167.
- [3] SCHÜMANN U, GIÈRE S, KURRAT M. Breakdown Voltage of Electrode Arrangement in Vacuum Circuit Breakers [J].

IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 557-562.

- [4] SCHÜMANN U, KURRAT M. Breakdown Voltage of Electrode Arrangments in Vacuum in Consideration of Surface Area [C]// Proceedings of IEEE 19th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2002: 459-462.
- [5] TOYA H, HAYASHI T. Statistical Property of Breakdown Between Electrode and Shield in High-voltage Vacuum Interrupter[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1985, 13(5): 311-314.
- [6] TOYA H, UENO N. Statistical Property of Breakdown Between Metal Electrodes in Vacuum [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and System, 1981, 100(4): 1932-1939.