

真空开关的触发失效与主电极烧蚀特性研究

吴昊¹, 周志成¹, 吉亚民², 刘洋¹, 陈娜¹, 孙秋芹¹, 马勇¹

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 南京 211103; 2. 江苏省电力公司检修分公司, 南京 211102)

摘要: 通过对真空开关的导通与失效机理进行研究, 将其分为触发机构和主电极两个部分。关于触发机构的失效机理, 主要研究绝缘电阻、触发电流和主放电电流大小的变化对触发极烧蚀的影响; 用真空电弧的机理分析主电极烧蚀, 对导通过程中电弧的发展进行仿真, 了解主电极烧蚀特性。通过对真空开关的触发失效和主电极烧蚀特性进行研究, 更好地了解真空开关的导通机理。

关键词: 真空开关; 触发失效; 烧蚀; 寿命

Investigation to Trigger Failure and Main Electrode Ablation of Vacuum Switch

WU Hao¹, ZHOU Zhicheng¹, JI Yamin², LIU Yang¹, CHEN Na¹, SUN Qiuqin¹, MA Yong¹

(1. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Jiangsu Electrical Power Company Maintenance Branch, Nanjing 211102, China)

Abstract: The conduction and failure mechanisms of a vacuum switch are analyzed by dividing the switch into a trigger mechanism and a main electrode. To understand the failure mechanism of the trigger electrode, the effects of insulation resistance, triggering current and main discharge current on trigger electrode ablation are investigated. The main electrode ablation is analyzed with vacuum arc theory, and the arc development is simulated to observe the main electrode ablation characteristics. The investigation to the trigger failure and the main electrode ablation characteristics can help to deeply understand the conduction mechanism of the vacuum switch.

Key words: vacuum switch; trigger failure; ablation; life

0 引言

真空开关是近几十年出现的开关电器。20 世纪 70 年代, 中压开关无油化浪潮在全球范围内掀起, 由此给真空开关的发展带来了机遇。真空开关仅用了不到 20 年的时间就取代了少油开关而成为中压领域的主导产品, 在配电系统及许多领域得到推广和应用。相比油断路器、磁吹断路器和空气断路器等传统开关装置, 真空开关以真空作为绝缘和灭弧介质, 具有耐压强度高, 开断能力强等优点^[1-6]。

1 真空开关的结构

真空开关的结构设计见图 1。阳极和阴极各 3 个棒电极, 交错排列, 电极柱截面呈梯形。棒电极等距离竖立在主电极平台上, 阴极平台中央是触发极, 触发极通过瓷环固定在阴极上, 并由瓷环的侧表面

构成触发极和阴极之间的绝缘沿面间隙。

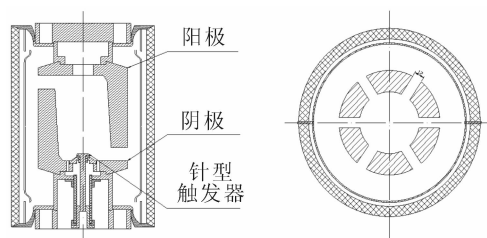


图 1 真空开关结构图

Fig. 1 Structure of vacuum switch

真空开关实验电路包括主回路和触发回路两个部分。

主回路见图 2, 主回路中升压变压器变比是 1:250, 二极管 D 为高压整流硅堆, 电阻 r 为限制充电电流的电阻, 5 k Ω /100 W, 电容 C 为储能电容, 1 200 μ F/13 kV, 电阻 R 为高能带状电阻用来模拟负载, 阻值 0.1 Ω 。

真空开关的典型触发回路见图 3。图 3 中: D_1 是硅堆; r_1 为触发回路充电电阻, 500 Ω ; C_1 为触发回

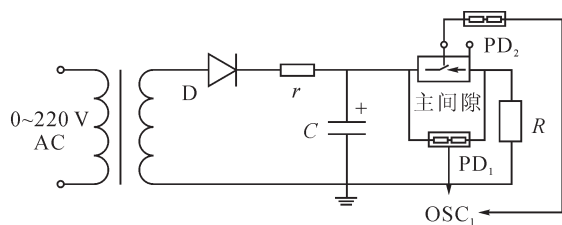


图2 主回路电路

Fig. 2 Main circuit

路充电电容, $69 \mu\text{F}$; K 为触发控制开关; T_1 为高频隔离脉冲变压器。220 V 的交流电压由变压器升压, 通过二极管 D_1 整流后经电阻 r_1 对电容 C_1 充电, 当开关 K 合上, 电容 C_1 将放电, 在脉冲变压器原边形成一个低压脉冲, 经脉冲变压器的副边形成高压脉冲, 使真空开关的触发极沿面击穿, 形成初始等离子体, 最终导致主间隙导通。

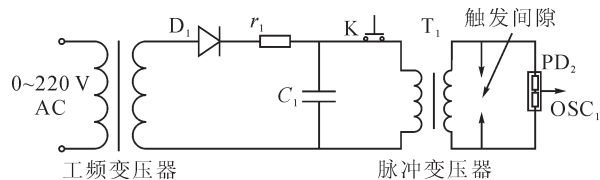


图3 触发回路

Fig. 3 Trigger circuit

PD_1 、 PD_2 为泰克 P6015A 高压探头, 分别测量真空开关的主间隙电压和触发电极与阴极之间电压; OSC_1 为泰克 TDS 2024B 示波器, 用于观测电压波形。

2 真空开关的触发机构失效机理

为了解触发机构的失效机理, 需要掌握开关的导通过程。一般把真空中绝缘子沿面闪络的过程分为 3 个阶段: 第 1 阶段初始等离子体产生的过程; 第 2 阶段等离子体倍增形成的过程; 第 3 阶段绝缘子表面闪络击穿的过程。目前研究对于第 1 阶段和第 3 阶段的观点基本一致, 对于第 1 阶段的沿面放电击穿起始过程, 认为初始电子一般在金属, 真空和陶瓷的三面交界处产生, 这里是场畸变最严重, 电子最容易逸出的地方。当通过外触发脉冲时, 在触发极和阴极之间产生很高的脉冲电场, 在此电场负极性端的三面交接处就会有初始电子发射。对于第 3 阶段的看法也一致, 即在绝缘子表面的脱附气体中发生最后闪络击穿。但是对于第 2 阶段即等离子体倍增形成的过程, 有各种不同的观点, 如二次电子发射假说(secondary electron emission avalanche, SEEA), 电子触发极化松弛假说(electron triggered polarization relaxation, ETPR)^[7-14]。

在实验中通过观察绝缘极电阻的变化, 以及其受触发电流和主放电电流大小的影响, 来了解触发机构的失效过程。

2.1 绝缘极电阻

绝缘极电阻变化情况反应绝缘材料表面附着金属的变化, 根据电阻计算式(1)。

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1)$$

实验中固定电阻的长度和截面积, 通过测量电阻来反映电阻率的变化。对于图 4 所示陶瓷的触发电极来说, 电阻按式(2)表示。

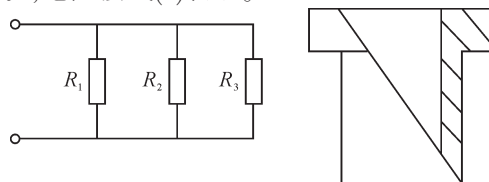


图4 陶瓷触发电极

Fig. 4 Ceramic trigger

从触发电极和阴极两端测得的电阻 R 为

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \quad (2)$$

式(2)中: R_1 为陶瓷表面附着金属的电阻; R_2 为陶瓷表面釉的电阻; R_3 为陶瓷自身的电阻。

电阻 R 受到两方面的影响, 首先在真空环境下, 真空开关导通时, 主电极放电主要靠电极材料电离产生的金属蒸汽, 这些金属蒸汽会向四面八方喷射, 不可避免地会喷射到触发电极的表面上, 并冷凝沉积在触发电极的表面。主回路电流越大, 脉宽越长, 在触发电极表面沉积的金属就会越多, 相当于在开关的触发电极表面附着一层金属, 金属层使得 R_1 减小, 整个绝缘极电阻也就随之减少。其次当触发电极触发时, 触发电极和阴极就会在陶瓷表面产生沿面击穿放电, 这个放电虽然跟主电极放电比, 电流要小的多, 但也会烧蚀和蒸发掉触发电极表面已经沉积的金属物质, 增大绝缘极电阻 R 。另外像釉这样的半导体材料电阻具有负的温度系数, 当开关进行大电流放电时, 将会产生大量的热在真空管内, 热量不能及时的散掉, 所以电阻 R_2 将减小, 整个绝缘极电阻也将减小。

绝缘极电阻随着实验的进行, 两端的电阻变化规律见图 5。实验中陶瓷片的长度和截面积都没有变化, 由式(2)可以得到电阻率变化规律。

由图 5 可以看, 到绝缘极电阻从 $500 \text{ M}\Omega$ 下降到 $0.25 \text{ M}\Omega$ 。绝缘极电阻可以大致反映绝缘环的金属附着情况, 以此来了解真空开关触发电极的寿命。当绝缘极电阻下降到几百 $\text{k}\Omega$ 时, 真空开关触发电极不能满足每次都能触发, 将影响开关的导通性能。

2.2 触发电流对触发电极烧蚀的影响

主间隙导通放电时, 会产生大量金属蒸汽, 这些金属蒸汽会沉积在触发电极表面, 导致绝缘环电阻

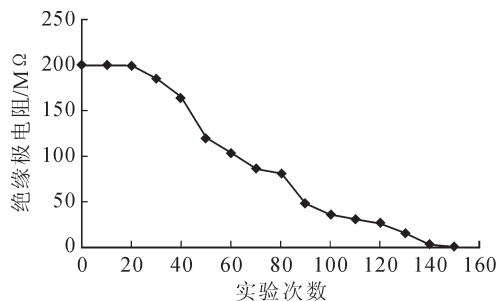


图5 绝缘极电阻随实验次数的变化曲线

Fig. 5 Insulation resistance curves with the number of experiments

下降。导通时电流越大,导通时间越长,沉积在绝缘环表面的金属颗粒越多,触发极表面污染越严重,电阻越小。如果沉积的金属完全覆盖住绝缘环表面,触发极和阴极相当于短路,在两端加上电压,虽然触发极表面有电流流过,但是不能产生初始等离子体,真空开关主间隙不能导通,开关失效。但是如果在触发极两端加上很大的电流,触发能量很大时,流过的触发极电流产生很大的热量,使沉积在绝缘环表面的金属颗粒熔化烧蚀,绝缘电阻将上升。如果这种情况持续下去,表面附着金属和半导体材料都被烧光,绝缘电阻又会变得很大,触发电压也将变大。因此绝缘环表面状态受到两方面影响,一个是主电极放电产生的等离子体沉积,一个是触发极有电流流过时表面颗粒的烧蚀,这两个方面相互竞争。如果触发极电流对绝缘环表面金属离子的烧蚀大于主放电电流的金属离子的附着,触发极电阻能维持在一个很大的值。反之,当主放电电流很大,产生的金属离子远远大于触发极电流对绝缘环表面金属离子的烧蚀,触发极电阻将快速下降到很低的值,使得开关不能正常导通,开关寿命终止^[15-19]。

在真空开关两端加 10 kV 主电压,改变触发极两端电压和触发极两端电流,研究绝缘环两端电阻的变化,得到触发电流大小对触发极烧蚀的影响。实验中触发电路和触发回路参数都相同,只改变触发电压大小,从而改变触发电流和触发能量的大小。各种触发电流下绝缘极电阻随着实验次数的变化见表 1。

从表 1 可以得到,当真空开关在小电流、小能量下触发时,触发电阻经过 60 次后下降,触发寿命较短。当触发电流上升时,触发阻值也将上升,寿命延长。但是如果触发电流太大,将使绝缘极电阻过大,触发电压太高,也是不可取的。因此实验时取一合适的触发电流进行实验,当触发极绝缘电阻开始下降时,可适当增大触发电流,去除附着在绝缘环

表 1 各种触发电流下绝缘极电阻随着实验次数的变化

Table 1 Insulation resistance curves with the number of experiments in different trigger current

触发电流/A	20次/ MΩ	40次/ MΩ	60次/ MΩ	80次/ MΩ	100次/ MΩ	150次/ MΩ
500	200	200	120	100	50	50
1 000	200	170	150	130	100	100
5 000	200	200	220	300	500	500

表面的金属粒子,适当延长真空开关使用寿命。

2.3 主放电电流对触发极烧蚀的影响

在触发极两端加 700 A 电流不变,改变主回路充电电容和电压大小,进行主回路电流在 100、200 kA 下的真空开关寿命实验。

主回路电流 100 kA 下的寿命试验见图 2、3,在主电容 C 上施加 10 kV 主电压,触发极两端加 500 V 电压使真空开关触发,用 Pearson 探头测得在真空开关阴极和阳极之间的电流,电流探头衰减 10 000 倍。主回路电流见图 6。

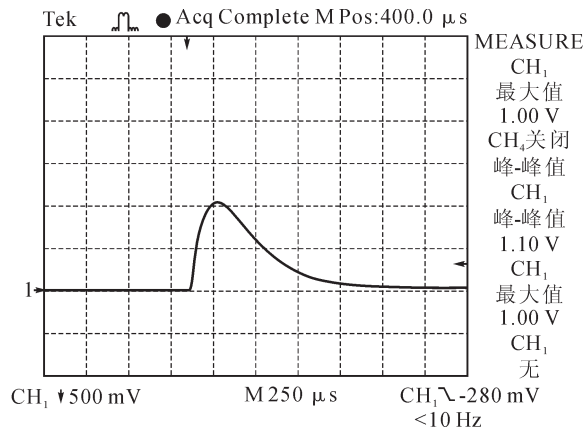


图6 100 kA 电流波形图

Fig. 6 100 kA current curve

重复上述实验 300 次,实验结果见图 7。

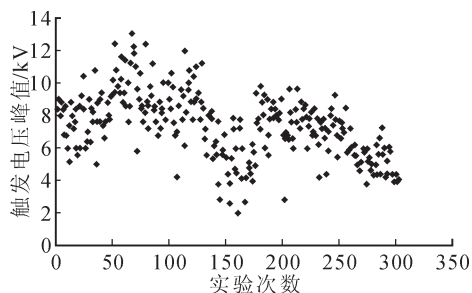


图7 触发电压峰值和实验次数关系

Fig. 7 The relationship between trigger voltage and the number of experiments

由图 7 可以看到,触发电压峰值的变化曲线,最初触发电压在 10 kV 左右,有一个逐渐下降又回升的过程,触发电压最低为 2 kV。触发电压峰值最后在 4~5 kV 之间。实验后用摇表测量绝缘极两端

电阻,绝缘极电阻仍然保持很高的绝缘水平,维持在 $300\text{ M}\Omega$ 。结果证明,重复这个实验 300 次后,真空开关工作可靠,导通性能良好。

在大电流寿命实验过程中,由于真空电弧主要由电子和金属蒸汽电离形成的金属离子和原子构成,金属蒸汽扩散在整个真空开关管体内部,冷却下来以后,金属蒸汽不可避免的会沉积在触发绝缘间隙上,使触发电压有所下降。但是触发绝缘间隙即陶瓷绝缘环表面因为涂覆了一层釉材料,减少了金属微粒对绝缘间隙击穿电压的影响,使得真空开关在经过 300 次 100 kA 大电流寿命实验之后的触发电压在 $4\sim 5\text{ kV}$ 左右。

在主电容 C 上施加 20 kV 主电压,触发极两端加 500 V 电压使真空开关触发,测得电流波形见图 8。

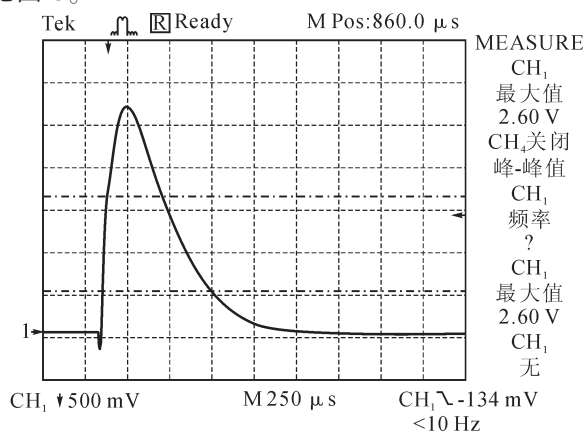


图 8 200 kA 电流波形图

Fig. 8 200 kA current curve

触发电压峰值和实验次数曲线见图 9。从图 9 可以看到,在 20 kV 主电压下,重复实验 30 几次,开关绝缘极电阻下降很快从 $500\text{ M}\Omega$ 降到 0,开关不能触发导通,使用寿命截止。

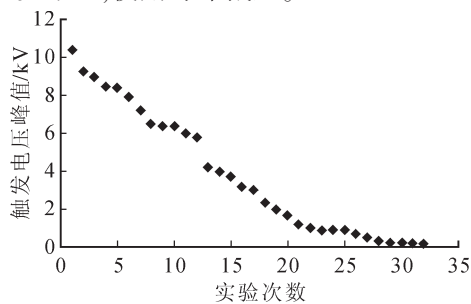


图 9 触发电压峰值和实验次数曲线

Fig. 9 The relationship between trigger voltage and the number of experiments

从上述实验知,真空开关可以通过 200 kA 的大电流,转移电量为 90 C ,但是使用寿命会下降很多。因此可以看到,主放电电流的大小对触发极烧蚀的影响明显,在主回路电流为 100 kA 时,触发极

预计有千次的使用寿命,但当回路电流上升到 200 kA 时,使用寿命只有几十次。

3 真空电弧的原理与模型仿真

因为笔者研究的是低气压下真空电弧特性,在低气压真空环境中,由于两个电极之间气体分子稀少,气体之间碰撞电离很少,真空电弧是由电极材料本身放出的蒸气电离后形成的^[20]。真空开关间隙主要包括两部分:棒电极端面与相对另一极之间的间隙,简称棒—板间隙;两个棒电极之间的间隙,简称棒—棒间隙,由此开关放电会有棒—板间隙和棒—棒间隙多个电弧通道^[21-22]。

真空电弧一般由 3 部分组成:阴极区、弧柱区和阳极区^[19]。阴极和阳极中真空电弧的示意图见图 10。

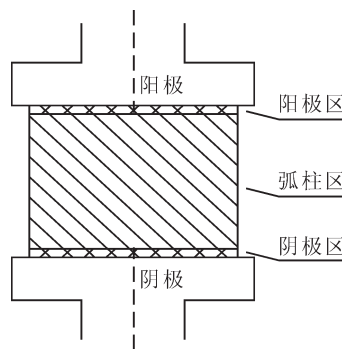


图 10 真空开关电弧的原理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the vacuum switching arc

3.1 真空电弧模型建立

该节介绍真空开关内多个棒—棒电极间隙之间的电弧转移机理,了解放电过程中电弧的发展过程。真空开关的开通过程是电弧发展过程,先导通棒—板间隙,再导通棒—棒间隙。相关文献说明,这个转移的时刻只与电流值有关,在 $5\sim 9\text{ kA}$ 之间,与波形无关^[23]。所以,笔者结合文献用电弧转移的方法来解释真空开关中电弧发展阶段。

因为真空开关的间隙属并联关系,假设电弧在各间隙间是平均分布的,真空开关中多个并联间隙简化为只有棒—板间隙和棒—棒间隙。真空开关间隙结构等效电路见图 11,上面为棒—棒间隙,下面为棒—板间隙。因为棒—板间隙电场强将首先导通,棒—棒间隙则是由电弧转移来开通的。其中 R_1 、 L_1 为接线电阻和电感值,测得分别为 $0.1\text{ }\mu\Omega$ 和 $0.2\text{ }\mu\text{H}$ 。 R_2 为导通时棒—棒间隙导通时电极电阻,即电流沿真空开关电极侧面方向流动时的电阻。 R_3 为棒—板间隙导通时电极电阻,即电流沿真空开关电极长度方向流动时的电阻。文中所用电极材料,电阻率 $0.0175\text{ }\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$,长宽厚分别为 $7\text{ cm}\times$

2.5 cm×1 cm, 由式 $R=\rho\frac{l}{s}$ 计算可得 R_2 、 R_3 分别为 0.625 $\mu\Omega$ 和 4.9 $\mu\Omega$ 。对真空开关的电极, 实际中常用 LC 回路产生振荡电流波, 如果在电流第一个过零点真空开关自身不能截断就正好是一个完整的正弦电流波。可以假设外电源 $i(t)$ 为电流源, 表示为 $i(t)=I_m\sin\omega t$, 其中 I_m 为电流幅值, ω 为电源角频率。

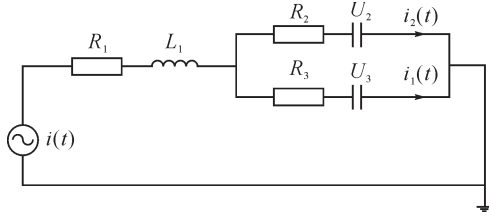


图 11 电弧转移阶段电路图

Fig. 11 Circuit diagram of arc transfer phase

文[23]指出, 当电流峰值小于 5 kA 时, 真空开关棒—板间隙先导通, 电流 $i(t)$ 流过该支路, 在真空开关棒—板间隙之间产生电弧电压 U_3 。因为电流小, 电弧只在棒—板间隙中发展, 还没有扩散到棒—棒间隙中, 文献报道此过程持续 50 μs 。当电流峰值大于 5~9 kA 时, 在 50 μs 时刻真空开关棒—棒间隙发生燃弧击穿, 产生电弧, 令其电弧电压为 U_2 。

根据图 11 列出此时联立方程

$$\begin{cases} i_1 R_1 + U_1 = i_2 R_2 + U_2 \\ i_1(t) + i_2(t) = i(t) = I_m \sin\omega t \end{cases} \quad (3)$$

解此方程可得 $i_1(t)$ 和 $i_2(t)$ 的表达式为:

$$i_1(t) = \frac{I_m R_2 \sin\omega t - U_1 + U_2}{R_1 + R_2}; \quad (4)$$

$$i_2(t) = \frac{I_m R_1 \sin\omega t + U_1 - U_2}{R_1 + R_2}. \quad (5)$$

3.2 仿真结果分析

根据上述分析建立 pspice 仿真模型, 见图 12, 其中棒—板间隙和棒—棒间隙均用开关模拟。电弧模型主要由电压源和理想开关组成, 这里的电弧模型是简化了的电弧模型, 主要以电弧电压来表征。文[19]指出: 通过实验统计, 一般地, 电流在 1~6.5 kA 之间, 电弧电压约 40 V。此时作为扩散态真空电弧, 单位燃弧面积上的电弧电阻基本相同且不变, 所以假设棒—板间隙和棒—棒间隙电弧电压为 40 V。电流源为一周期 1 000 μs 、峰值 50 kA 的脉冲电流, 如同文[23]中电流波。

图 13 为此时的电流波形, 其中最上面波形为总电流波形, 与文献中基本一致, 是一个光滑的正弦半波。最下面波形为棒—板间隙电流, 在电弧转移前由它承担全部主电流, 转移后其电流开始迅速下降, 其占主电流比重很低。观察此时的电弧形态, 可知随着棒—棒间隙电弧的开始, 棒—板间隙电弧

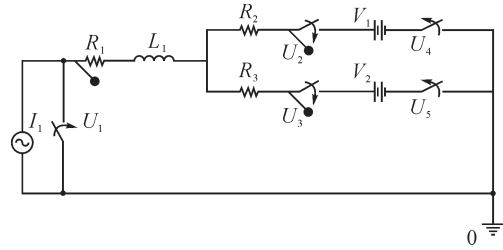


图 12 电弧转移仿真模型

Fig. 12 Simulation model of arc transfer

的相对光亮变小。最后, 电弧经过半波零点截流, 两种间隙的电弧同时零点熄灭。由于该仿真是考虑在理想状态下, 电弧从棒—板间隙迅速转移充斥到整个棒—棒间隙的情况, 所以波形中 i_1 、 i_2 变化很快, 但实际中电弧转移会有一个过程, i_1 、 i_2 之间的转移会有一个过渡时间。

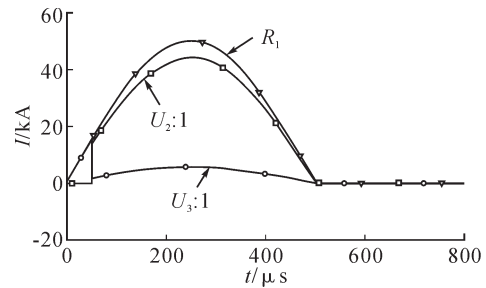


图 13 电弧转移电流波形

Fig. 13 Current waveform of arc transfer

图 13 中居中的波形为棒—棒间隙电流波, 它出现在总电流 50 μs 之后, 此时总电流已达十几 kA (比文献中的电流值稍大), 但是出现之后基本呈现正弦波, 也就是说总电流的主要部分由它负担。这个现象既符合真空开关的设计思想, 也是符合经解剖后真空开关的电极烧蚀的客观事实, 即侧面棒—棒烧蚀程度大于棒—板的烧蚀程度。将真空开关解剖, 发现其棒—板间隙表面只有轻微烧蚀, 烧蚀主要集中在棒—棒间隙表面, 与仿真结果一致。

4 结语

高功率真空开关触发极失效将影响整个开关的使用寿命, 因此笔者从触发环电阻开始研究, 发现随着实验次数增加, 绝缘极电阻也逐渐减小。实验结果得到在一定程度上, 随着触发电流的增加, 触发极电阻同步增大, 但是随着主放电电流的增大, 触发极寿命开始明显下降。通过用真空电弧的原理解释主电极烧蚀与失效机理, 建立了真空电弧的模型, 从而得到多棒型真空开关首先在棒—板之间放电产生电弧, 最后在棒—棒之间形成电弧的结论。因此, 这种结构能将电弧分割成多段, 并使真空电弧保持在扩散状态。笔者通过对真空开关的触发

失效和主电极烧蚀特性的研究,更好地解释了真空开关的导通机理。

参考文献:

- [1] OKUBO H, YANABU S. Feasibility study on application on high voltage and high power vacuum circuit breaker[C]//Proc. XXth ISDEIV. Paris, France: IEEE, 2002: 75-278.
- [2] GARZON R D. High voltage circuit breakers design and applications[M]. 2nd edition. New York and Basel: Marcel Dekker Inc., 2002: 129-195.
- [3] KANEDO E. Recent trends and actives of vacuum interrupters in Japan[C]//Darmstadt XIth Inter Symposium on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum. [S.l.]: IEEE, 1992: 399.
- [4] BOXMAN R I. Triggered mechanisms in triggered vacuum gaps[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1997, 24(2): 122-128.
- [5] 廖敏夫, 邹积岩, 段雄英, 等. 高性能真空触发开关技术的研究综述[J]. 高压电器, 2006, 42(1): 51-54.
LIAO Minfu, ZOU Jiyan, DUAN Xiongying, et al. Overview on techniques of high-performance triggered vacuum Switch[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1): 51-54.
- [6] YUN-SIK J. Noble crowbar circuit for compact 50 kJ capacitor bank[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(2): 525-530.
- [7] BOERSCH H, HAMISCH H, EHRLICH W. Surface discharges across insulators in vacuum[J]. Zeitschrift Fir Angewandte Physik, 1963, 15(6): 518-525.
- [8] BLAISE G, LE-GRESSUS C. Charging and flashover induced by surface polarization relaxation process[J]. Journal of Applied Physics, 1991, 69(9): 6334-6339.
- [9] HOSONO T, KATO K, MORITA A, et al. Surface charges on alumina in vacuum with varying surface roughness and electric field distribution[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(3): 627-633.
- [10] KATO K, KATO H, ISHIDA T, et al. Influence of surface charges on impulse flashover characteristics of alumina dielectrics in vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(6): 1710-1716.
- [11] ANDERSON R A, BRAINARD J P. Mechanism of pulsed surface flashover involving electron x2010; Stimulated desorption[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(3): 1414-1421.
- [12] DE TOURREIL C H, SRIVASTAVA K D. Mechanism of surface charging of high-voltage insulators in vacuum[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1973, EI-8(1): 17-21.
- [13] CROSS J D. High speed photography of surface flashover in vacuum[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1978, EI-13(3): 145-148.
- [14] GONG H, ONG C K, LE-GRESSUS C. New observation of trapped charge transportation on circularly bound polymethylmethacrylate surface[J]. Applied Physics Letters, 1995, 67(15): 2243-2245.
- [15] 何俊佳, 邹积岩, 王海, 等. 触发真空开关中初始等离子体的产生和扩展[J]. 高压电器, 1996, 32(6): 3-5.
HE Junjia, ZOU Jiyan, WANG Hai, et al. Production and expansion of primary plasma in triggered vacuum switches[J]. High Voltage Apparatus, 1996, 32(6): 3-5.
- [16] VOZDVIJENSKY V A. Initial stage of discharge current growth in a triggered vacuum gap[C]//Proc. 14th ISDEIV. Santa Fe, USA: [s.n.], 1990: 532-535.
- [17] 王季梅, 苑舜. 大容量真空开关理论及其产品开发[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
WANG Jimei, YUAN Shun. Theory of large capacity vacuum switch and its product development[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [18] 姚学玲, 陈景亮, 曾正中. 低气压放电开关沿面闪络触发器的性能研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 73-77.
YAO Xueling, CHEN Jingliang, ZENG Zhengzhong. Experimental investigation of surface flashover trigger device for low-pressure discharging switch[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 73-77.
- [19] 王季梅. 真空开关理论及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
WANG Jimei. The theory and application of vacuum switch[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986.
- [20] NAM S H, LEE B J, PARK S S, et al. Spectroscopic measurement of high current vacuum arc plasma in triggered vacuum switch[C]//IEEE Conference Record-Abstracts Pulsed Power Plasma Science. [S.l.]: IEEE, 2001: 546-549.
- [21] ZHAO Chun, ZOU Jiyan, LI Xiaopeng, et al. Study of a three-stage reconnection electromagnetic launcher using triggered vacuum switches[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 219-222.
- [22] FAN Xingming, QIU Honghui, LIAO Minfu, et al. Verification of a fast making switch based on triggered vacuum switch and vacuum circuit breaker[C]//International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Matsue, Japan: [s.n.], 2006: 240-243.
- [23] SIDOROV V A, ALFEROV D F, KOROBOVA N I. Dielectric strength of triggered vacuum switches with six-gap electrode system[C]//International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Eindhoven: [s.n.], 1998: 788-791.

吴昊(1986—),女,工程师,工学博士,主要从事高电压试验技术、高压开关方面的研究工作。