

文章编号: 1001- 1609(2006) 03- 0169- 03

杯状纵磁真空灭弧室开断能力与触头直径和触头开距的关系

刘志远, 王仲奕, 张 炫, 王季梅

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Relationship Between Interrupting Capacity of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters with Cup Type Contacts and Contact Diameters and Contact Gaps

LIU Zhi-yuan, WANG Zhong-yi, ZHANG Xuan, WANG Ji-mei

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 研究了杯状纵磁真空灭弧室的极限电流开断能力与触头直径和触头开距间的规律, 建立便于设计时应用的计算公式。从合成回路上开断能力的试验结果出发, 将三维有限元法对杯状纵磁触头的纵向磁场的计算结果引入到开断能力与触头直径和触头开距的关系式中, 初步得到极限电流开断能力与触头直径和触头开距的关系为 $I=k \times D^2 \times B_z^{0.4}$, 式中 k 是系数。该式的物理意义是开断能力随触头直径的增加而增大, 随触头开距的增加而减小。

关键词: 纵向磁场; 有限元法; 真空灭弧室

中图分类号: TM561

文献标识码: A

Abstract: Relationship between limit interrupting capacity of axial magnetic field vacuum interrupters with cup type axial magnetic field contacts and their contact diameters and contact gaps is studied. Test data from synthetic circuit is used and axial magnetic flux density from 3D eddy current field calculation by FEM is introduced to obtain the relationship. It suggests that the relationship between limit interrupting capacity and contact diameter and contact gap is $I=k \times D^2 \times B_z^{0.4}$, where k is a constant. The physical meaning of the relationship is that the limit interrupting capacity increases with increasing of contact diameter and decreases with increasing of contact gap.

Key words: axial magnetic fields(AMF); finite element methods(FEM); vacuum interrupter

1 引言

在真空灭弧室中使用纵向磁场电弧控制技术来提高其开断能力主要在于: ①使真空电弧在大电流下仍处于扩散状态, 大大减轻对触头表面局部的烧

蚀, 从而减小电流过零后触头表面向弧隙中的蒸发, 使介质快速恢复。②使电弧电压保持在较低水平, 从而使真空电弧的电弧能量小。真空断路器的最主要性能参数是极限短路电流开断能力, 影响其开断能力的因素有很多, 如电极结构、电极材料、电极直径、电极开距和分闸速度曲线等。现在真空灭弧室设计工程师依靠丰富的经验完全可以设计出满足各种性能要求的真空灭弧室产品, 包括满足极限短路电流开断能力要求。这说明真空灭弧室的性能参数与设计参数之间存在着一定的规律, 而且这种规律已经被“定性”地了解了, 而笔者的目的是探寻其定量的规律。由于开断能力是真空灭弧室的最重要的性能参数, 笔者选择从开断能力作为切入点。

关于真空灭弧室的开断能力与设计参数的联系规律的定量研究已有如下工作。文[1]对线圈式纵磁触头结构的 10 kV 真空灭弧室的极限短路电流开断能力的研究表明, 真空灭弧室的极限短路电流开断能力与触头直径的 1.4 次方成正比, 若 I 为极限开断电流; D 为触头直径; k 为系数, 其经验公式为:

$$I=k \times D^{1.4} \quad (1)$$

文[2]结合文[1]提出了式(1), 并结合文[3]提出了“有效面积”的概念, 即: 触头表面的强烧蚀区域与纵向磁场大于等于 4 mT/kA 的面积相符合, 在不同直径的 1/2 匝, 1/3 匝和 1/4 匝线圈式纵磁触头结构的 10 kV 真空灭弧室开断试验结果中, 得出了真空灭弧室的极限开断电流正比于触头直径的平方与有效面积百分比的乘积, 若触头有效面积百分比为 A , 则该经验公式为式(2):

$$I=k \times D^2 \times A\% \quad (2)$$

以上研究只考虑了真空灭弧室的一个设计参

收稿日期: 2005- 12- 11

基金项目: 西安交通大学自然科学基金项目, 项目编号(xjj2003005)。

作者简介: 刘志远(1971-), 讲师, 博士, 研究方向为真空电弧理论及其应用。

数-即触头直径的影响。而真空灭弧室在不同的电压等级中使用时的触头开距不同,而且触头开距对其开断能力有直接的影响。因此该文将同时考虑真空灭弧室的极限短路电流开断能力与触头直径和触头开距之间的定量关系。

文[4]对 3 种触头直径 45, 60, 70 mm 的杯状纵磁真空灭弧室在 5 种不同开距,即: 3, 6, 9, 12 mm 和 15 mm 下进行了极限短路电流开断试验,试验在具有引弧支路的合成回路上进行,试验结果见表 1。图 1 为该试验结果与式(1)计算结果的对比。由图 1 可知,在同一触头开距下式(1)的计算结果基本与实验结果相符。但是在不同开距下,式(1)中的 k 值是不同的,这意味着要用大量的试验来确定不同开距下的 k 值。

表 1 杯状纵磁灭弧室的开断能力

开距 /mm	开断电流 /kA		
	D=45 mm	D=60 mm	D=70 mm
3	16.77	27.02	33.90
6	16.46	28.90	32.60
9	16.15	27.00	32.00
12	14.91	23.60	30.28
15	13.04	22.36	26.40

注: D 为触头直径,表 2, 3 同。

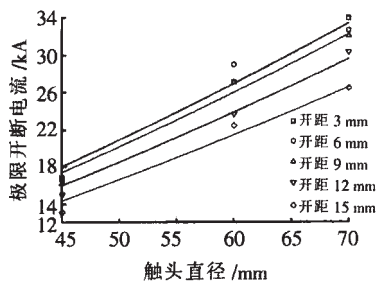


图 1 不同直径不同开距下杯状纵磁真空灭弧室开断能力

文[5]用相似理论对表 1 的试验结果进行了总结,得到真空灭弧室极限开断能力的经验公式为:

$$I=0.83D^{1.57}/d^{0.82} \quad (3)$$

式(3)中: D 为触头直径; d 为触头开距。

该公式说明真空灭弧室的开断能力随触头直径的增加而增大,随触头开距的增加而减小。

笔者对表 1 所示的试验结果进行了进一步的分析发现,如果在公式中引入纵向磁场,则可得到真空灭弧室的极限短路电流开断能力与触头直径和触头开距的关系为:

$$I=k \times D^2 \times B_z \quad (4)$$

式中: k 为系数; D 为触头直径; B_z 为纵向磁感应强度, 为幂指数。

该式表明: ①开断能力与触头面积成正比,当触头直径加大时开断能力增强; ②开距加大时纵向磁场减弱,使得对真空电弧的控制能力降低,从而开断能力随触头开距的加大而减小。

2 分析过程

因为在采用纵向磁场的真空灭弧室中,纵向磁场对真空电弧起到直接的控制作用,因此笔者设想将纵向磁场引入到开断能力与触头直径和触头开距之间的联系规律中。因为触头直径和触头开距的变化都会引起纵向磁场的变化,所以在公式中纵向磁场是一个中间变量,它包含了触头直径和触头开距的影响。同时纵向磁场随触头开距的增加而减小的趋势与开断能力随开距增加而减小的趋势相一致,因此在公式(4)中未出现触头开距这一变量,它的影响体现在纵向磁场中。

笔者对表 1 所示杯状纵磁触头的三维涡流磁场进行了计算,计算模型见图 2,计算参数同文[4]。计算中触头开距设为满开距,电弧直径与触头直径相等。计算结果取每 kA 电流下,电流峰值时开距中心平面触头中心点的纵向磁感应强度值。



图 2 杯状纵磁触头涡流磁场有限元分析模型

计算采用 Maxwell 3D 电磁场有限元软件。交流电流频率为 50 Hz。计算中取 CuCr50 触头材料电导率为 $1.044 \times 10^7 \text{ S/m}$,电弧电导率约为 2000 S/m 。计算场域为模型的 10 倍,在软件中设定计算能量误差判据为小于 1%时计算终止。

在 3 种触头直径和 5 种触头开距下,开距中间平面触头中心点的纵向磁感应强度值计算结果见表 2。

表 2 杯状纵磁真空灭弧室纵向磁感应强度幅值

开距 /mm	磁感应强度 /mT		
	D=45 mm	D=60 mm	D=70 mm
3	12.169	8.881	7.254
6	11.278	8.402	6.949
9	10.291	7.973	6.681
12	9.469	7.578	6.392
15	8.727	7.146	6.107

由表 2 可以看出,纵向磁场随触头直径的增加而减弱,随触头开距的增加也减弱。

对照表 1 和表 2,可以得到真空灭弧室极限短路电流开断能力与触头直径和触头开距关系为:

$$I=3.079 \times 10^{-3} \times D^2 \times B_z^{0.4} \quad (5)$$

式中: I 为极限开断电流, kA; D 为触头直径, mm; B_z 为纵向磁感应强度, mT。

与式(5)相对应,在 3 种触头直径和 5 种触头开

距下的极限开断电流能力的计算值见表 3。对比表 3 与表 1 可知, 据式(5) 计算所得的开断电流与试验结果非常接近。

表 3 计算所得杯状纵磁真空灭弧室开断电流

开距 /mm	开断电流 /kA		
	D=45 mm	D=60 mm	D=70 mm
3	16.94	26.55	33.33
6	16.43	25.97	32.76
9	15.84	25.43	32.25
12	15.32	24.92	31.69
15	14.83	24.34	31.11

3 讨论

因为在弧隙中的纵向磁场为三维分布, 即纵向磁场沿径向和轴向都是变化的, 因此在式(4) 中纵向磁场如何选取是一个需要关注的问题。该文中选取了一个典型点- 开距中心平面触头中心点的纵向磁场值。式(4) 中纵向磁场的幂指数项反映了纵向磁场分布的影响。当触头开距进一步加大时, 纵向磁场的轴向分布将更加不均匀, 式(4) 有待进一步的修正和完善。

式(4) 局限于文[4]中讨论的范围及试验结果, 对于其它的设计参数, 公式的适用性有待于新的试品的试验数据验证。为此已准备了新一轮试验, 对公式进行校核。如果经过新的试验验证公式成立, 将有可能为真空灭弧室的定量设计提供理论参考。

由于真空灭弧室的性能参数有很多, 除短路电流开断能力外, 还有额定电流的通流能力、工频和冲击电压耐受能力, 以及机械强度性能等; 而真空灭弧

室的设计参数除了触头直径和触头开距外, 还有触头材料、触头结构、屏蔽罩尺寸、玻璃或陶瓷外壳尺寸等许多因素。而真空灭弧室的性能参数和设计参数间一定存在着某种联系, 而这种联系规律有可能被定量地表示出来, 因此笔者工作是向认识这种联系规律方向前进的第一步。

4 结语

真空灭弧室的极限短路电流开断能力与触头直径和触头开距的关系有可能用式(4) 来定量描述; 它表明了开断能力随触头面积增加而增大, 随触头开距的增加而减小。

参考文献:

- [1] Watanabe K, Kaneko E, Yanabu S. Technological Progress of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters [J]. IEEE Trans. on Plasma Science. 1997, 25(4): 609-616.
- [2] Henon A, Altimani T, Picot P, et al. 3D Finite Element Simulation and Synthetic Tests of Vacuum Interrupters with Axial Magnetic Field Contacts [C]// IEEE 20th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tours, 2002: 463-466.
- [3] Fenski B, Heimbach M, Shang W. The Influence of Unipolar Axial Magnetic Field on the Behavior of Vacuum Arcs [J]. IEEE Trans. Plasma Sci., Apr. 2003(31): 299-302.
- [4] 孙云生. 真空灭弧室触头开距对开断性能的影响 [D]. 西安: 西安交通大学硕士学位论文, 1992.
- [5] 王承玉. 真空灭弧室屏蔽罩电位测试与真空电弧的研究 [D]. 西安: 西安交通大学博士学位论文, 1993.

(上接第 168 页) 的畸变越强。颗粒的表面积越大, 颗粒捕获电子的能力也会越大。在正极性条件下, 相同的体积比小米与绿豆的击穿电压差别不大。在负极性下相同的体积比条件下, 粒径小的颗粒击穿电压比粒径大的颗粒击穿电压小。

4 结语

该文的气固两相体雷电冲击电压 U_{50} 实验表明:

(1) 相同体积比下, 气固两相体的正极性击穿电压低于负极性。

(2) 正极性时体积比对击穿电压影响不大, 但击穿电压随体积比变化呈小波动变化。负极性时体积比对 U_{50} 影响显著, 可使 U_{50} 降幅达 30%。

(3) 相同的体积比下, 正极性时颗粒大小对击穿电压影响不大; 负极性时小颗粒的击穿电压比大颗粒的击穿电压低。

参考文献:

- [1] Yumoto M, Sakai T. Achievement of Recent Research on Electrical Discharge and their Practical Application in Japan

[J]. IEEE Elect. Insul., 2000, 16(1): 32-40.

- [2] Kubuki M, Yoshimoto R, Tanoue K, et al. Breakdown Characteristic in Air Gaps with Artificial Floating Metals under DC Voltage [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electric Insulation, 1995, 2(1): 155-166.
- [3] Mizuno A, Yamazaki Y, Yoshida H. AC Energized Ferroelectric Pellet Bed Gas Clearer [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1992, 28(3): 535-540.
- [4] Tsukamoto S, Naminira T, Wang D, et al. Effect of Fly Ash on NO_x Removal by Pulsed Streamers [J]. IEEE Trans. on Plasma Science. 2001, 29(1): 29-31.
- [5] Russ H, Neiger M, Lang J E. Simulation of Micro Discharges for the Optimization of Energy Requirements for Removal of NO_x from Exhaust Gases [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1999, 27(1): 38-39.
- [6] Tsukamoto S, Naminira T, Wang D, et al. Effect of Fly Ash on NO_x Removal by Pulsed Streamers [J]. IEEE Trans. on Plasma Science. 2001, 29(1): 29-31.
- [7] 王秉钧, 王昌长, 谈克雄. 数理统计在高压技术中的应用 [M] (第 1 版). 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [8] 清华大学, 西安交通大学. 高电压绝缘 [M] (第 1 版). 北京: 电力工业出版社, 1980.
- [9] 唐兴柞. 高电压技术 [M] (第 1 版). 重庆: 重庆大学出版社, 1995.