

杯状纵磁真空灭弧室开断能力与触头直径和触头开距关系的试验比对

刘志远¹, 程少勇¹, 王季梅¹, 何广丽², 王荃², 毕冬丽²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 陕西宝光真空电器股份有限公司, 陕西 宝鸡 721006)

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

LIU Zhi-yuan¹, CHENG Shao-yong¹, WANG Ji-mei¹, HE Guang-li², WANG Quan², BI Dong-li²

(1. School of Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Baoguang Vacuum Device Co. Ltd., Baoji 721006, China)

摘要: 对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关系 $I=k \cdot D^2 \cdot B_z^{0.4}$ 进行了试验验证。当触头直径分别为 48, 58, 66 mm 时, 触头开距设定为 8, 11, 14 mm, 对 9 只真空灭弧室试品在振荡回路上进行极限开断能力试验; 用三维有限元方法对 9 种情况下的纵向磁场进行了计算; 将计算结果带入公式与试验结果及灭弧室开断能力标定值进行比较, 考虑试验的误差, 认为公式有参考意义。

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: The relationship between maximum interrupting capacity of AMF vacuum interrupters with cup type contacts and their contact diameters and contact gaps is proposed to be $I=k \cdot D^2 \cdot B_z^{0.4}$, which is experimentally validated in this paper. The contact diameters of the prototype vacuum interrupters are 48, 58 and 66 mm and the contact gaps are 8, 11 and 14 mm separately. 9 vacuum interrupters are tested with oscillation circuit to measure their limit interrupting capacity. Axial magnetic flux density in the 9 cases is analyzed by 3D finite element method. With the calculated axial magnetic flux density results, limit interrupting capacity of the vacuum interrupters is predicted by the equation, which is compared with the experimental results and rated interrupting capacity. Considering experimental errors, the prediction results are meaningful.

Key words: axial magnetic field(AMF); finite element method(FEM); vacuum interrupter

0 引言

真空断路器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特性等。真空断路器的性能参数与设计参数之间存在着一定的规律, 经验丰富的设计工程师可以设计出满足各种性能要求的真空断路器及真空灭弧室产品。在文[1]中提到真空灭弧室的极限短路电流开断能力与触头直径的 1.4 方成正比, 在文[2]中得到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。为了定量地揭示真空灭弧室开断能力与两个最重要的影响因素-触头直径和触头开距之间的规律, 根据文[3]的合成回路真空灭弧室开断试验结果, 引入单位电流产生的纵向磁场作为中间变量, 总结出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:

$$I=k \cdot D^2 \cdot B_z \quad (1)$$

式中: k 为系数; D 为触头直径; B_z 为杯状纵磁触头开距中心平面触头中心点电流峰值时的纵向磁感应强度, 为幂指数。

公式(1)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, 从而使开断能力随触头开距的加大而减小。笔者将对此公式做进一步的试验验证及分析。

1 试验装置

采用合成回路对真空灭弧室的极限开断能力进行验证, 但是由于西安交通大学的合成回路电压源部分正在改造过程中, 不能投入试验, 因此只能用振

收稿日期: 2006-01-11; 修回日期: 2006-03-18

基金项目: 西安交通大学校自然科学基金项目(xjj2003005)。

作者简介: 刘志远(1971-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为真空电弧理论及其在真空开关中的应用。

荡回路(仅有电流源)进行试验比对。

试验共用了 9 只玻璃外壳杯状纵磁真空灭弧室试品-真空灭弧室触头直径为 48, 58, 66 mm 的试品各 3 只。在每个触头直径下作 3 种触头开距-8, 11, 14 mm 的极限开断试验。在试验中将开断电流不断增加, 当电流波形超过 1 个半波时认为开断失败, 然后将开断电流减小 1 kA, 再次开断, 直到成功开断的上限和失败开断的下限在 1 kA 以内为止。最后取成功开断的上限为在该触头直径和触头开距下的极限开断能力。

用游标卡尺测量灭弧室在打开和闭合位置时, 动导电杆导电夹与灭弧室底座支撑板之间的距离差就可得到触头开距。

纵向磁场的三维涡流场有限元分析采用 Maxwell 3D 电磁场有限元软件, 计算模型见图 1。交流电流频率为 50Hz。计算中取 CuCr50 触头材料电导率为 1.8×10^7 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。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。

2 试验及分析结果

2.1 极限开断能力试验结果

表 1 分别为 3 种触头直径的真空灭弧室试品在 8, 11, 14 mm 这 3 种触头开距下的试验结果。表 2 在表 1 的基础上总结出 9 只试品的极限开断能力。

2.2 纵向磁场计算

对表 2 中给出的杯状纵磁触头的 3 维涡流磁场进行了计算, 计算模型见图 1。在 3 种触头直径和 3 种触头开距下, 电流为 1 kA 有效值时, 开距中间

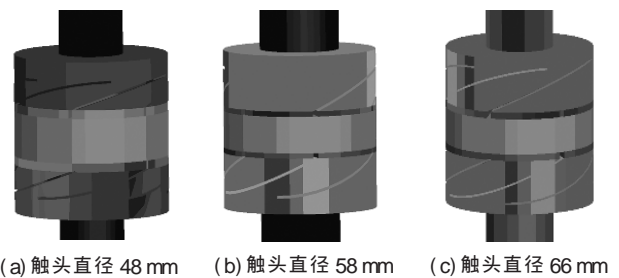


图 1 杯状纵磁触头涡流磁场有限元分析模型

表 1 触头直径分别为 48, 58, 66 mm 时的极限开断能力试验结果

触头直径 48 mm						触头直径 58 mm						触头直径 66 mm					
开距 8 mm		开距 11 mm		开距 14 mm		开距 8 mm		开距 11 mm		开距 14 mm		开距 8 mm		开距 11 mm		开距 14 mm	
电流有效值 /kA	是否 1 个半波开断	电流有效值 /kA	是否 1 个半波开断	电流有效值 /kA	是否 1 个半波开断	电流有效值 /kA	是否 1 个半波开断	电流有效值 /kA	是否 1 个半波开断	电流有效值 /kA	是否 1 个半波开断	电流有效值 /kA	是否 1 个半波开断	电流有效值 /kA	是否 1 个半波开断	电流有效值 /kA	是否 1 个半波开断
19.3	否	6.0	是	约 10	否	10.4	是	10.4	否	10.4	否	19.0	是	20.1	否	18.7	是
19.5	是	3.9	是	18.5	是	19.5	是	19.2	是	20.0	是	21.5	是	21.4	是	20.7	是
20.3	是	9.1	是	20.0	否	20.7	是	21.3	否	21.5	是	22.9	是	23.3	是	24.5	否
23.6	否	18.9	是	15.6	是	22.3	是	21.1	是	23.1	是	27.0	是	28.3	是	24.8	是
22.5	是	20.7	是	19.3	是	25.1	是	23.6	是	24.8	是	29.9	否	31.4	否	26.1	是
24.5	是	23.4	是	20.9	是	26.4	否	25.5	否	26.2	是	28.1	是	30.2	否	27.5	否
25.6	否	25.3	否	22.9	是	25.9	是	25.1	是	27.7	否	29.5	是	29.9	否	26.7	否
25.6	否	24.35	是	24.7	是	26.4	否	26.4	否	26.9	否	30.8	否	28.0	否	-	-
24.8	否	25.0	是	23.9	是	-	-	-	-	-	-	29.9	否	-	否	-	-
-	-	25.0	否	25.5	否	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 2 杯状纵磁灭弧室的极限开断能力

开距 /mm	开断电流 /kA		
	直径 48 mm	58 mm	66 mm
8	24.5	25.9	29.5
11	25.0	25.1	28.3
14	24.7	26.2	26.1

表 3 杯状纵磁真空灭弧室纵向磁感应强度幅值

开距 /mm	B_z /mT		
	直径 48 mm	58 mm	66 mm
8	10.66	8.35	9.98
11	10.32	7.93	9.57
14	9.40	7.44	9.09

平面触头点在电流峰值时的纵向磁感应强度值计算结果见表 3。由表中可以看出纵向磁场随触头开距的增加而减弱, 但由于触头开槽的角度及旋转角不同, 触头直径不同时单位电流产生的纵向磁场各有不同。

2.3 开断能力分析

采用文[3]中的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的试验数据可得到:

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

式中: I 为极限开断电流 (kA); D 为触头直径 (mm);

B_z 为 1 kA 电流下电流峰值时开距中心平面触头中心的纵向磁感应强度 (mT)。

根据式 (2), 在 3 种触头直径和 3 种触头开距下的极限开断电流能力的计算值见表 4。为了方便与试验值对比, 将试验值也列在表 4 中。可以看出公式预测值与试验值有一定误差。

3 讨论

关于试验值和理论值之间的误差产生原因讨论

表 4 计算所得杯状纵磁真空灭弧室开断电流

	开距 /mm	触头直径 48 mm	触头直径 58 mm	触头直径 66 mm
试验开断 电流 /kA	8	24.5	25.9	29.5
	11	25.0	25.1	28.3
	14	24.7	26.2	26.1
公式预测开 断能力 /kA	8	18.3	24.2	33.7
	11	18.0	23.7	33.1
	14	17.4	23.1	32.4

如下:

(1) 在试验中未加暂态恢复电压 TRV。由于试验条件的限制, 未能施加 TRV。因为没有 TRV 的考核, 得到的真空灭弧室极限开断能力并不准确, 与其真实值之间有误差。

(2) 开距测量误差。调整开距时用游标卡尺瞄准导电杆上导电夹的某一点, 测量导电夹与灭弧室底座支撑板之间的距离, 因此在测量中结合了目测, 与测量者的视角有关, 测量误差可能在 mm 数量级。在本组试验中开距之间的差别仅为 3 mm, 因此开距的误差对试验结果有影响。

(3) 机械振动。在试验中观察到在接近开断极限时, 由于电动力很大, 使得连接断路器的铜编织母线拉动断路器产生强烈振动, 甚至跳跃, 这对于真空灭弧室的极限开断能力会有直接的影响。

(4) 在式(2)中的系数是由文献[1]中的试验数据拟合出来的, 采用的是 13 年前的产品。现在的真空灭弧室产品开断能力有明显提高, 因此式(2)中的系数对现在的试验结果不一定适用, 需要进行更多的试验验证。

上述 3 种触头直径的真空灭弧室试品在开距为 8 mm 时都已通过型式试验, 触头直径为 48 mm 时, 开断能力为 20 kA; 触头直径为 58 mm 时, 开断能力为 25 kA; 触头直径为 66 mm 时, 开断能力为 31.5 kA。将开断能力的额定值, 预测值和试验值一起绘制在图 2 中, 公式预测值与额定值更为接近一些, 考虑到上述可能产生误差的原因, 可认为公式有参考意义。

进一步的工作应提高试验的精度。建议电压源

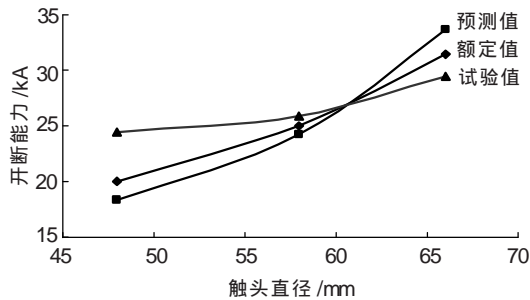


图 2 触头开距 8 mm 时, 3 种触头直径下开断能力的额定值, 预测值及试验值的比较

部分改造后在试品上施加 TRV, 采用更精确的开距测量方法, 将断路器固定于地面减小振动, 以及对更多的试品进行试验验证, 加大采样数量。

4 结论

为了验证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 $I = k \times D^2 \times Bz$, 采用了 9 只真空灭弧室试品- 触头直径分别为 48, 58, 66 mm, 触头开距分别为 8, 11, 14 mm 在振荡回路上进行短路电流极限开断能力试验。采用关系式 $I = 3.079 \times 10^{-3} \times D^2 \times Bz^{0.4}$ 得到的预测值与试验值有一些误差, 考虑到试验误差并且与真空灭弧室的开断能力额定值相比较, 初步证明关系式 $I = k \times D^2 \times Bz$ 有一定的参考意义。文中结果还需要更多的试验数据和更好的试验手段来进一步验证。

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] 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, 1992.

(上接第 249 页)

整方便, 可广泛应用于三相四线有源电力滤波器等电力电子系统中。

参考文献:

- [1] De Doncker. Current Regulator for a Four-leg Three-phase Inverter[P]. U.S. Patent US05280421, Jan, 1994.
- [2] 孙 驰, 毕增军, 魏光辉. 一种新颖的三相四桥臂逆变器解耦控制的建模与仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 124-130.
- [3] Ryan M J, Rik W, De Doncker, et al. Decoupled Control of

a Four-leg Inverter Via a New 4×4 Transformation Matrix[J]. IEEE Trans. on PE, 2001, 16(5): 694-700.

- [4] 张崇巍, 张 兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] Quinn C A, Mohan N, Mehta H. A Four-wire Current Controlled Converter Provides Harmonic Neutralization in Three-phase Four Wire Systems [C]// IEEE APEC '93. San Diego, California, USA, 1993: 841-846.
- [6] Venkataramanan G, Divan D M, Jahns T M. Discrete Pulse Modulation Strategies for High-frequency Inverter Systems[J]. IEEE Trans. on PE, 1993, 8(3): 279-287.