

杯状纵磁触头纵向磁场滞后时间研究

刘志远, 王仲奕, 王季梅, 修士新

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Study on Phase Shift Time of Cup-type Axial Magnetic Field Contact

LIU Zhi-yuan, WANG Zhong-yi, WANG Ji-mei, XIU Shi-xin

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

摘要: 用有限元法对杯状纵磁真空灭弧室触头简化的轴对称模型涡流场进行了分析, 给出了触头间隙中纵向磁场滞后时间的空间分布, 讨论了触头设计参数对纵向磁场滞后时间的影响。计算结果表明, 纵向磁场滞后时间沿径向分布的形状近似于凹面朝下的抛物线右半部, 在触头边缘处纵向磁场滞后时间随径向位置增大而线性增加。纵向磁场滞后时间沿轴向的分布规律是, 靠近触头中心处, 纵向磁场滞后时间沿轴向的变化接近一条直线; 越靠近触头边缘这种变化越显著, 在杯壁中间处呈不规则的“正弦曲线”分布, 在触头边缘处呈凹面朝上的抛物线分布。纵向磁场滞后时间与设计参数的关系是: 纵向磁场滞后时间随开距的减小而线性增加; 随触头直径的减小而单调递减; 随触头片厚度的增加而线性增加; 触头材料从 CuCr50 变到 CuCr25 时纵向磁场滞后时间增幅显著; 杯壁厚度和杯高度对纵向磁场滞后时间几乎没有影响。

关键词: 真空灭弧室; 磁场滞后时间; 触头; 涡流; 真空电弧

中图分类号: TM561

文献标识码: A

Abstract: Eddy current field in cup-type contact of vacuum interrupter with axial magnetic field is analyzed by finite element method with a simplified axial symmetric model. Spatial distribution of phase shift time between axial magnetic field and source current is studied. Afterwards, effects of contact design parameters on the phase shift time are analyzed. It is found that radial distribution of the phase shift time looks like the right part of parabola that has a maximum value. The phase shift time increases linearly with radius at the contact edge. The axial distribution of phase shift time is nearly a straight line at center of contact. But the distribution changes significantly near the contact edge. At middle position of the coil, the axial distribution looks like an irregular sinusoidal curve, and at edge of the contact, the distribution is a parabola with a minimum

value. It is shown that the phase shift time increases linearly when contact gap decreases, reduces monotonically with decrease of contact diameter, increases linearly with increase of contact thickness, and increases sharply when contact material changes from CuCr50 to CuCr25. Coil thickness and height have little effect on the phase shift time.

Key words: vacuum interrupter; phase shift time; contact; eddy current; vacuum arc

1 引言

真空断路器的电流开断是在真空灭弧室中完成的。真空灭弧室利用电流在触头中流动所产生的横向磁场或纵向磁场来控制真空电弧。所以触头设计是真空灭弧室设计中至关重要的环节。设计一个比较理想的真空灭弧室, 必须了解设计参数对真空灭弧室性能的影响。

在纵向磁场真空灭弧室中, 当交流电流过零时, 纵向磁场并不立即过零, 而是滞后一定时间过零, 约束了电弧等离子体在电流过零时的扩散, 在暂态恢复电压(TRV)的作用下, 当磁场滞后时间较长时, 真空断路器成功开断的可能性降低。另外, 当触头刚刚分离时, 在高速摄影机的观测下, 可以看到真空电弧呈一明亮的柱形, 随后真空电弧迅速扩散^[1]。而纵向磁场在滞后一定时间后才能作用在真空电弧上, 如果这个滞后时间较长, 则对触头表面的烧损趋于严重。因此磁场滞后时间是真空灭弧室研究和开发人员关注的问题之一。

电磁场有限元分析是研究涡流及其引起的磁场滞后的有效方法。文[2]用轴对称模型对纵向磁场真空灭弧室中的涡流进行了分析; 文[3]对 1/3 匝线圈的磁场进行了三维有限元分析, 得到磁场滞后时间标么值沿电极径向的分布; 文[4]对 1/3 匝线圈触头, 杯状纵磁触头, 马蹄铁式触头和管式触头进行了三维有限元分析, 得到触头片中电流密度分布和触头

片表面中心点的纵向磁场滞后时间;文[5]对杯状纵磁触头中的涡流进行了三维有限元分析,得到触头片中涡流分布和触头间隙中电流过零时的纵向磁场分布。虽然上述文献考虑到涡流的影响,并得到关于纵向磁场滞后时间的许多有价值的信息,但是关于杯状纵磁真空灭弧室纵向磁场滞后时间在触头间隙中沿径向和轴向的空间分布以及触头设计参数对纵向磁场滞后时间的影响还没有相关报道。笔者的目标是通过杯状纵磁真空灭弧室触头涡流场的有限元分析,得到纵向磁场滞后时间在触头间隙中径向和轴向的空间分布,在此基础上进一步研究触头设计参数对纵向磁场滞后时间的影响。

2 有限元模型

杯状纵磁触头的结构见图 1(a)。触头共有 6 个杯指,杯指与水平面夹角为 27° 。每个杯指旋转 90° 。触头片上有 6 个径向直槽。电流在杯指中流动时产生与电弧弧柱轴方向一致的纵向磁场。触头设计参数为:开距 10 mm,触头直径 75 mm,杯壁厚 8 mm,杯高 18 mm,触头片厚 4 mm,触头材料 CuCr50(电导率为 1.044×10^7 S/m),交流电流频率为 50 Hz。在分析中采用图 1(b)的轴对称模型进行简化,杯指等效为线圈,杯指中电流折算成线圈中的电流。计算时取电流为 1000 A(有效值),边界条件取为无穷远。

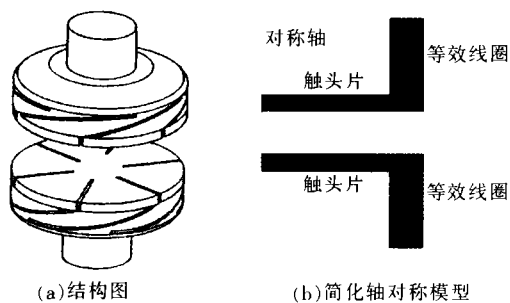


图 1 杯状纵磁触头

采用 Maxwell SV 软件对图 1(b)所示的轴对称模型进行了涡流场有限元分析。由于该软件采用了自适应网格剖分技术,计算误差可减小到任意指定值。计算中能量误差小于 1%。触头结构参数与文[5]一致,磁感应强度 B 的二维简化误差在触头开距中心点为 1.3%,触头片表面中心点为 9.95%。误差产生的原因主要是二维模型无法计及触头片上开槽。

3 纵向磁场滞后时间的分布

电流过零时, B 在场域内的矢量分布见图 2。电流过零时场域内的 B 是由涡流产生的。电流过零时 B 的最大值为 1.74 mT。位置在触头中心处。图 3 为触头开距中心点上的纵向磁场滞后于电流图。由

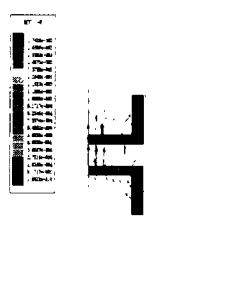


图 2 电流过零时磁感应强度的分布

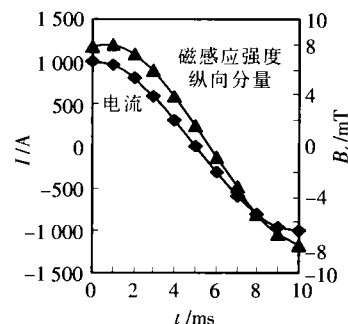


图 3 触头开距中心点纵向磁场滞后于电流

图 3 可以看出,纵向磁场滞后于电流,滞后时间为 0.66 ms。

3.1 纵向磁场滞后时间的径向分布

图 4(a)为纵向磁场滞后时间在开距中心平面的径向分布。纵向磁场滞后时间沿径向的变化呈下凹面抛物线右半部形状。触头中心位置纵向磁场滞后时间最长,为 0.66 ms。在接近触头边缘处,纵向磁场滞后时间随径向位置增大而线性增加。图 4(b)为纵向磁场滞后时间在触头表面的径向分布,其分布与图 4(a)相似。

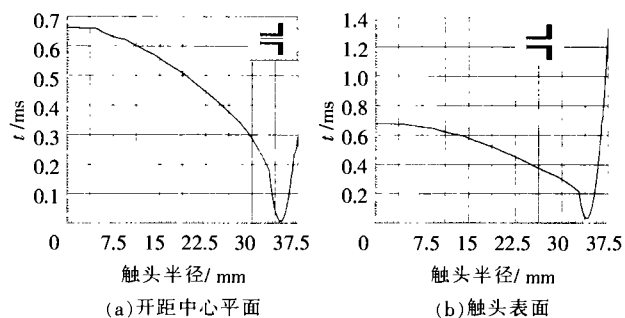


图 4 纵向磁场滞后时间的径向分布

3.2 纵向磁场滞后时间的轴向分布

图 5(a)为纵向磁场滞后时间在触头中心沿轴向的分布,接近一条直线,纵向磁场滞后时间为 0.66 ms。图 5(b)为纵向磁场滞后时间在触头半径一半处沿轴向的分布。图中纵向磁场滞后时间随位置的变化呈中间小,两边大的趋势,但变化并不明显,滞后时间从 0.51 ms 增加到 0.52 ms。图 5(c)为杯壁内径处纵向磁场滞后时间的轴向分布,在大部分距离内纵向磁场滞后时间为一常数 0.3 ms。在距触头表面 1.2 mm 范围内滞后时间从 0.3 ms 增加到 0.31 ms,呈线性变化。图 5(d)为杯壁中间处纵向磁场滞后时间的轴向分布。滞后时间沿轴向的变化规律像有些变形的“正弦曲线”,其中间值为 0.17 ms。图 5(e)为触头外边缘位置纵向磁场滞后时间的轴向分布。纵向磁场滞后时间沿轴向的变化为上凹面抛物线形状。在开距中心处纵向磁场滞后时间为最小值 0.3 ms。在触头表面处的纵向磁场滞后时间为最大值 1.4 ms。

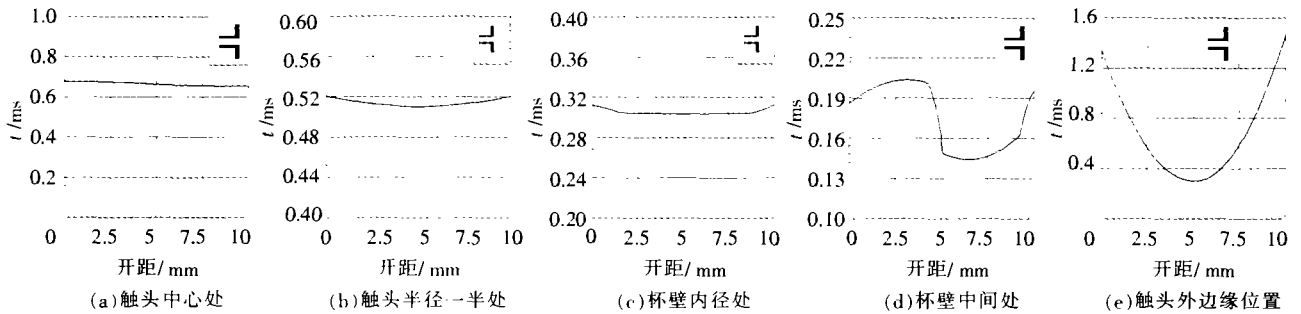


图5 纵向磁场滞后时间轴向分布

4 触头设计参数对纵向磁场滞后时间的影响

电流过零时电弧等离子体的扩散与涡流产生的磁感应强度 B 的幅值和磁场滞后时间都有密切的关系。对电弧扩散影响较大的是在某个位置上 B 幅值较大且磁场滞后时间长。由图2可知,在杯状纵磁触头结构中,触头中心处源电流过零时涡流产生的纵向磁感应强度高。由图3~5可知,在该位置纵向磁场滞后时间长。因此这个位置对电弧扩散的制约作用大,是一个典型位置。因此选择开距中心处触头中心点讨论触头设计参数对纵向磁场滞后时间的影响。笔者考虑的触头设计参数包括触头开距、触头直径、触头片厚度、触头材料电导率、线圈厚度和线圈高度。

4.1 开距对纵向磁场滞后时间的影响

设开距从1 mm变到10 mm,步长为1 mm,其它设计参数不变,得到触头开距对纵向磁场滞后时间的影响见图6,当开距从10 mm减小到1 mm时,纵向磁场滞后时间从开距中心处的0.66 ms线性增加到0.857 ms。这说明:①燃弧期间开距变化的过程中纵向磁场滞后时间不同。②触头刚分开时的纵向磁场滞后时间比满开距时要长,即纵向磁场作用在刚刚引燃的集聚型电弧的滞后时间比满开距时测得的时间要长。

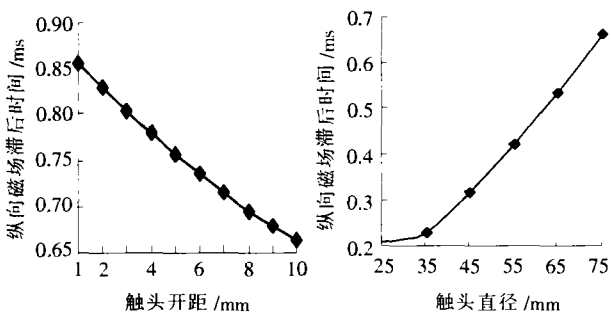


图6 纵向磁场滞后时间与触头开距的关系

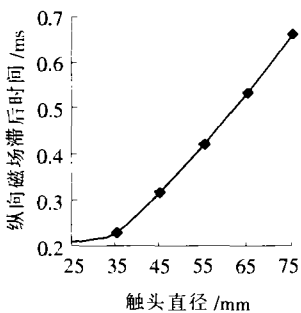


图7 纵向磁场滞后时间与触头直径的关系

4.2 触头直径对纵向磁场滞后时间的影响

令触头直径从25 mm变到75 mm,步长为10 mm,其它设计参数不变,得到触头直径对纵向磁场滞后时间的影响见图7,触头直径从75 mm减小到25 mm

的过程中,纵向磁场滞后时间单调减小,从0.66 ms减小到0.21 ms。真空灭弧室有小型化的发展趋势,真空灭弧室的小型化使触头直径趋于减小,这有利于纵向磁场滞后时间缩短。

4.3 触头片厚度对纵向磁场滞后时间的影响

令触头片厚度从3 mm变化到6 mm,步长为1 mm,其它设计参数不变,得到触头片厚度对纵向磁场滞后时间的影响,见图8。当触头片厚度从3 mm增加到6 mm时,纵向磁场滞后时间从0.52 ms线性增加到0.91 ms。为了缩短纵向磁场滞后时间,可适当减小触头片厚度。

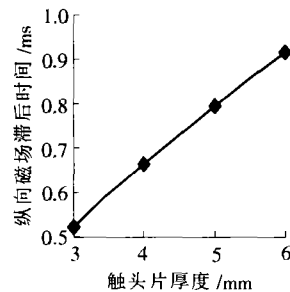


图8 纵向磁场滞后时间与触头片厚度的关系

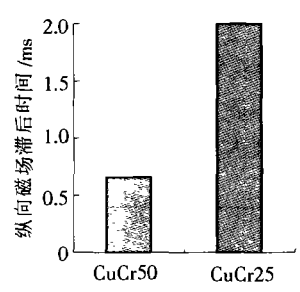


图9 纵向磁场滞后时间与触头材料电导率的关系

4.4 触头材料电导率对纵向磁场滞后时间的影响

取两种触头材料 CuCr50(电导率 1.044×10^7 S/m)和 CuCr25(电导率 3.4×10^7 S/m)。其它设计参数不变。图9示出了触头材料电导率对纵向磁场滞后时间的影响,电导率增加时纵向磁场滞后时间增幅显著。触头材料为 CuCr50 时,纵向磁场滞后时间为0.66 ms;触头材料为 CuCr25 时,滞后时间为2.00 ms。这是由于触头材料电导率增加后涡流幅值增大的缘故。

4.5 线圈厚度对纵向磁场滞后时间的影响

令杯壁厚度从5 mm增加到12 mm,步长为1 mm,其它设计参数不变。计算结果见图10。显然线圈厚度对纵向磁场滞后时间影响很小。当线圈厚度从5 mm增加到12 mm时,纵向磁场滞后时间从0.67 ms单调缩短到0.63 ms。

4.6 线圈高度对纵向磁场滞后时间的影响

令杯高从14 mm增加到24 mm,步长为2 mm,其它设计参数不变。计算结果见图11。显然杯高度

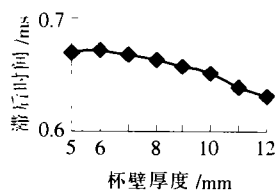


图 10 纵磁场滞后时间与杯壁厚度的关系

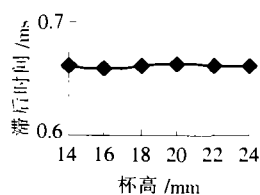


图 11 纵磁场滞后时间与杯高度的关系

的变化对纵向磁场滞后时间几乎没有影响。当杯高度从 14 mm 增加到 24 mm 时,纵向磁场滞后时间保持在 0.66 ms 左右,变化很小。因此对于设计人员来说减小纵向磁场滞后时间不用考虑线圈厚度和高度的影响。

5 结论

对杯状纵磁真空灭弧室触头轴对称模型涡流场进行了有限元分析,研究了纵向磁场滞后时间的径向和轴向分布以及触头设计参数对纵向磁场滞后时间的影响,得到如下结论:

(1)纵向磁场滞后时间沿径向减小,其分布形状近似于凹面朝下抛物线的右半部,在触头边缘处纵向磁场滞后时间随径向位置增大而线性增加。

(2)纵向磁场滞后时间沿轴向的分布规律是,靠近触头中心处,纵向磁场滞后时间沿轴向的变化接近一条直线;越靠近触头边缘,这种变化越显著,直至到达杯壁中间处形成不规则“正弦曲线”分布,在

触头边缘处,呈凹面朝上抛物线分布。

(3)设计参数对纵向磁场滞后时间的影响是:纵向磁场滞后时间随开距的减小而线性增加;随触头直径的减小而单调递减;随触头片厚度的增加而线性增加;触头材料从 CuCr50 变到 CuCr25 时,纵向磁场滞后时间增幅显著;杯壁厚度和杯高度对纵向磁场滞后时间几乎没有影响。

参考文献:

- [1] M B Schulman, H Schellekens. Visualization and Characterization of High-current Diffuse Vacuum Arcs on Axial Magnetic Field Contacts [J]. IEEE Trans. on Plasma Science. 2000, 28(2): 443-452.
- [2] B J Paul. Calculation of Eddy-current-induced Magnetic Fields in Vacuum Interrupters with Axial Magnetic Field Contacts[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1988, 24(5): 2 204-2 214.
- [3] K Nitta, K Watanabe, K Kagenaga, et al. Three-dimensional Magnetic Field Analysis of Electrodes for VCBs [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, 12(4): 1 520-1 525.
- [4] P N Stoving, E F Bestel. Finite Element Analysis of AMF Vacuum Contacts[A]. IEEE 18th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum[C]. Eindhoven, 1998.
- [5] 刘志远,王季梅,王政,等.杯状纵磁真空灭弧室三维纵向磁场及涡流的有限元分析[J].高压电器, 2000, 36(2): 18-21.

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

(上接第 86 页)

过零点关合而不发生预击穿。对于 10 kV 三相不接地系统,首先对 A、B 两相进行关合,由于断路器关合时间的不同期性,其中一相关合的是线电压,临界速度为 $v=0.29$ m/s。真空断路器在关合瞬间的合闸速度一般都大于 0.8 m/s,因此真空断路器在对 10 kV 系统进行同步关合时,一般都能符合上述速度的要求。

同理,对于 35 kV 接地系统,当触头间耐受电压的变化率大于系统电源电压在过零点时的变化率的 10%。对于三相不接地系统,可得临界速度为 $v=0.98$ m/s。对于 35 kV 系统,在电压过零点关合而不发生预击穿时的临界速度为 $v=0.98$ m/s。因此,对真空断路器的关合速度应有一定的要求。

4 结论

(1)当真空间隙较小时(小于 1.5 mm),击穿电压与间隙距离的关系可以表示为: $U=28.9 r^{0.7}$ 。

(2)根据拟合公式(1)及对真空灭弧室的电场计算,得出了真空灭弧室的击穿场强随间隙的变化。

(3)拟合公式可应用到真空断路器的同步关合中,在 10 kV 三相接地系统中,当断路器的合闸速度 $v \geq 0.17$ m/s 时,曲线与电压波形无交点,即可以在电压过零点关合而不发生预击穿。

参考文献:

- [1] 王季梅.真空开关[M].北京:机械工业出版社,1983.
- [2] K C Lin, N Chen. Voltage-peak Synchronous Closing Control for Shunt Capacitors [J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib, 1998, 145(3): 233-238.
- [3] Carlo Cereda. Synchronous Medium Voltage Circuit-breaker: ABB Solution Based on Magnetic Drive and Electronic Control[A]. CIRED 15th Conference on Electricity Distribution [C], Nice, 1999.
- [4] You Yimin, Chen Degui. The Optimal Design Parameters Selection of Permanent Actuator for Vacuum Circuit Breaker Based on Dynamic Characteristic Analysis [A]. 10th ISDEIV Proceedings[C], Tours, France, 2002.

作者简介:张敬菽(1975-),女,博士研究生,研究方向为电器仿真与特性计算。