

真空灭弧室预击穿的测量与分析

张敬菽¹, 陈德桂¹, 游一民², 李 静³, 任建军³, 王胜林⁴

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安高压电器研究所, 陕西 西安 710077;
3. 陕西宝光集团, 陕西 宝鸡 7210063; 4. 陕西警官职业学院, 陕西 西安 710043)

Measurement and Analysis of Pre-strike in Vacuum Interrupter

ZHANG Jing-shu¹, CHEN De-gui¹, YOU Yi-min², LI Jing³, REN Jian-jun³, WANG Sheng-lin⁴

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, Xi'an 710077, China; 3. Shaanxi Baoguang Group, Baoji 721006, China;
4. Shaanxi Police Vocational College, Xi'an 710043, China)

摘要: 通过对真空灭弧室击穿电压的测量,拟合出了真空灭弧室在小间隙下的击穿电压与间隙的关系式,结合对真空灭弧室电场强度的计算,得出了真空灭弧室的动、静触头在不同间隙下的击穿场强。将拟合到小间隙下的击穿电压与间隙的关系式应用到真空断路器关合时的预击穿特性,根据断路器的关合动特性,得到了断口间耐受电压随时间的变化规律,由此得出断路器实现同步关合的速度低限,以及在什么相位进行关合时暂态分量最小。

关键词: 真空断路器; 击穿电压; 击穿场强; 预击穿

中图分类号: TM561.1

文献标识码: A

Abstract: The expression of the strike voltage versus the gap smaller than 15 mm is derived from the experiments. Combining the calculation results of the electric strength in the vacuum interrupter, the values of the strike down strength between the contacts with different gaps can be obtained. Applying the fitting expression to the calculation of the pre-strike characteristic, the variation rule of the withstand voltage of vacuum interrupters is thus reached according to the closing dynamic characteristic, through which the minimum synchronous closing velocity and the predetermined phase value to achieve the minimum transient component could be estimated.

Key words: vacuum circuit breaker; strike voltage; strike down strength; pre-strike

1 概述

真空灭弧室在关合过程中,动静触头之间的距离越来越逼近,当距离小到某一个距离,致使已无法承受外加的电压时,真空间隙击穿。由于此时距离较小,可以认为是场致发射引起的击穿。

由于电极表面是凹凸不平的,并且有许多微小

尖峰存在。因此,当电极加上高电压时,电场将集中于某些尖峰的端部,并在端部形成极高的电场,引起电子发射,这种电子发射过程叫做场致发射。尽管电子流极小,由于尖峰的截面积积极小,约为 10^{-8} mm²,所以,电流密度可达 $10^5 \sim 10^6$ A/mm²。当场致发射电流流过这些尖峰时,会使它们发热、熔化和蒸发出大量金属蒸气。当电子穿过金属蒸气云时,使金属原子电离而引起击穿。从阴极上由场致发射所形成的电子束为电场所加速,这些高速运动的电子将迅速达到阳极,并不断轰击阳极,使阳极表面发热和熔化而释放出大量气体和离子。从阳极释放出来的离子又反过来打在阴极上,加强了阴极的场致发射。这样的反复过程最后使真空间隙击穿。

2 真空灭弧室预击穿的测量与计算

为了获得小真空间隙的击穿电压,在真空灭弧室生产厂的测试台上进行了真空灭弧室击穿耐压试验。试验在 GL-150 型高压老练测试台上进行,试品为两只 TD□3 和两只 TD3738 真空灭弧室,管号分别为 00027,00030,030401067,030401108。试验前,对每只灭弧室进行例行出厂老练试验,然后将灭弧室拉开不同的开距进行击穿试验,记录下灭弧室的开距及击穿电压值。图 1 为 4 只灭弧室在不同间隙下测得的灭弧室的动静触头之间的间隙与其击穿电压值的关系。用试验数据进行拟合,得出当真空间隙较小(小于 1.5 mm)时,击穿电压与间隙距离的关系为:

$$U = 28.9 r^{0.7} \quad (1)$$

式中: U 为击穿电压; r 为真空间隙。

图 1 中曲线为利用(1)式得出的理论值,点为 4 只灭弧室试验值。可以看出,试验值有一定的分散性,这是由于每一只灭弧室的触头表面凹凸状况不

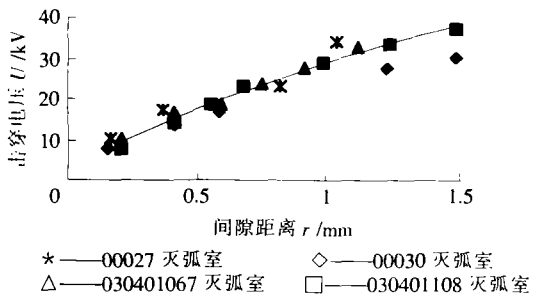


图1 击穿电压与间隙距离的关系

一样,其局部电场强度也不一样,因此,击穿电压也有一定的差别。用式(1)基本上可以体现试验测量值。因此,二者间的关系可用式(1)近似表示。

在开关的关合过程中,预击穿主要是由场致发射而引起的间隙击穿,所以灭弧室中动静触头之间的电场显得非常重要。为了获得真空灭弧室的击穿场强,采用有限元法对试验用的灭弧室进行了电场计算。图2为TD□3真空灭弧室内部的电场分布,从中可以看出,灭弧室内部电场最强的区域在灭弧室的动静触头之间。图3为灭弧室电场强度随半径的分布。根据式(1),求出灭弧室在不同开距下的击穿电压。将该电压值作为电场计算的初试值,应用电场计算 QUICKFIELD 有限元软件,对真空灭弧室的电场进行计算,求出其内部最大的电场强度,即可认为此时的电场强度为真空灭弧室的动静触头在不同间隙下的击穿场强。

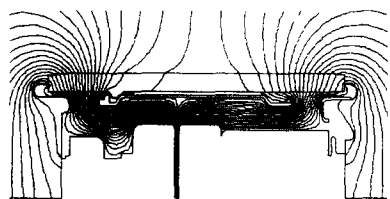


图2 真空灭弧室内部的电场分布

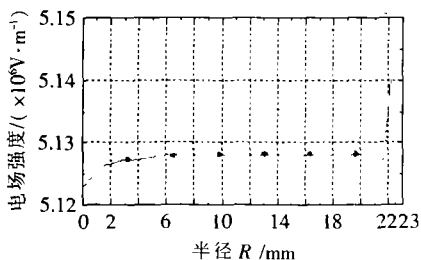


图3 灭弧室的电场强度随半径的分布

图4为真空灭弧室的动静触头在不同间隙下的击穿场强。从图中可知,真空灭弧室的击穿场强随着间隙的增大而减小。该结论与文[1]中的结论相同。

3 真空灭弧室的预击穿电压的应用

在真空灭弧室的设计与制造过程中,真空灭弧室的击穿电压是一个非常重要的参数。例如,真空灭弧室的绝缘耐压水平,灭弧室弧后的绝缘介质恢复强度,以及灭弧室在关合时的预击穿,这里主要将真

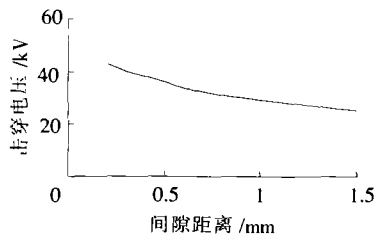


图4 不同间隙下的击穿场强

空灭弧室的击穿电压应用到真空灭弧室关合时的预击穿。

断路器在开断和关合电力设备的瞬时,系统电压的初相角通常都是随机的和不确定的,因此会产生过电压。例如,在关合空载变压器、电容器组和空载线路时,常常产生幅值很高的涌流和过电压。这不仅对系统中的设备不利,还可能引起保护误动作,影响电力系统的稳定。

采用同步关合可以减小涌流的幅值和电压的扰动,既限制了涌流和过电压,又省去了预置合闸电阻^[2,3],提高了系统运行的稳定性,同时也提高了系统的技术经济指标。

以关合电容器组为例,图5所示是单组电容器的接线图,G为电源,T为变压器,电容器组C经断路器CB₁接在母线B上。图6所示是计算涌流*i_c*的等值电路图,*L_s*为电源电感。

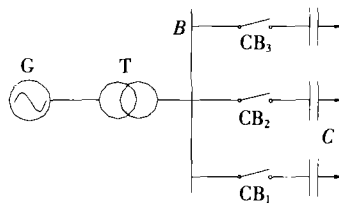


图5 单组电容器的接线图

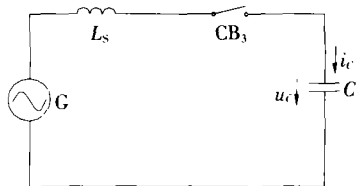


图6 计算电容器回路的等值电路图

应用电力系统电磁瞬态过程计算软件 PSCAD/EMTDC,计算出开关在不同相位进行关合时流过电容器上的涌流和电容器两端的电压。

电路参数的取值:在额定电压为12 kV电网中装有补偿电容器,容量为7 800 kvar,电容器安装处的短路容量为650 MVA,即 $C=173 \mu\text{F}$, $L_s=0.7 \text{ mH}$, $R=0.02 \Omega$ 。

图7(a)为开关在电压为零关合时($t_0=10 \text{ ms}$)的涌流,图7(b)为开关在电压峰值处关合时($t_0=5 \text{ ms}$)的涌流;图8为电容器组关合涌流的倍数与关合相位的关系。

从图8中可以看出,当 $t_0=10 \text{ ms}$,涌流的幅值仅

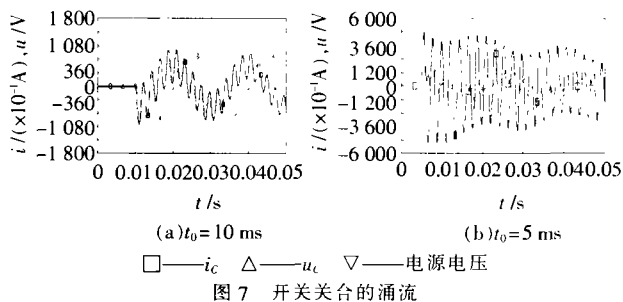


图7 开关关合的涌流

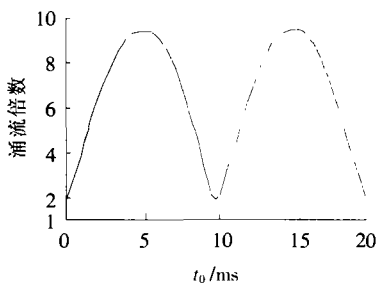


图8 电容器组关合涌流的倍数与关合相位的关系

为稳态值的 1.9 倍,且暂态过程较短。虽然开关在电源电压零点处关合,但仍然存在涌流,这是由于电容器上的电压、电感上的电流不能发生突变,此时电流为峰值,由于电源电感、线路电感的存在,不能直接进入稳态过程,就会产生暂态分量。当 $t_0=8\text{ ms}$,涌流的幅值为稳态值的 6.3 倍;当 $t_0=5\text{ ms}$,涌流的幅值达到稳态值的 9.5 倍,且暂态过程较长,对电力设备的危害较大。当 t_0 在 $0\sim 5\text{ ms}$ 范围内,涌流的倍数随着 t_0 的增大而增大;当 t_0 在 $5\sim 10\text{ ms}$ 范围内,涌流的倍数随着 t_0 的增大而减小。因此,如果能够将断路器控制在 0 或者 10 ms 附近关合电容器,将大大减小涌流的倍数。

上述关合过程是认为开关间隙为理想间隙,即开关触头闭合前,绝缘强度为无限大,开关触头闭合后,回路电阻为零。但在实际关合过程中,开关触头能够耐受的电压是有限度的,会发生预击穿现象。即开关在关合过程中,触头还没闭合,就会发生绝缘击穿现象,同时回路就会导通。因此,同步关合初相角的选择与真空断路器的预击穿特性有关。同时,合闸速度直接影响着断路器预击穿时间,因此合闸速度是很重要的参数。合闸速度和断口两端的电压以及灭弧室断口两端所能承受的电压确定了断路器进行同步关合时的关合相位。如图 9 所示,在关合电容器组时,假设断口的电源侧受到系统正弦交流电压的作用,而电容器上的电压为零。此时,在电压过零时关合是比较理想的。然而,断路器的触头在关合过程中,断口间隙上要承受一定的耐压,在关合残压为零的电容器组时,触头两端的电压为系统电压。断口所能承受的电压与合闸位移有关,图 9 中的曲线 1,2,3 为断路器预定于电源电压零点进行关合时,断口间耐压随时间的变化。较低的关合速度会使断口耐受

电压对时间的特性曲线的斜率较低,如图 9 曲线 2,图 9 预击穿的点发生在两条曲线的交点。如果断路器的关合速度不够高,原预定于电压过零点进行关合(曲线 2),由于触头在关合时发生了预击穿而使触头之间导通,产生很大的瞬态过程,使产品没有达到同步关合的目的。较高的关合速度会使断口耐受电压对时间的特性曲线的斜率较高,如曲线 3,可以在预定的电压零点处进行关合。只有关合速度达到足够高,才能实现同步关合。即应满足触头间耐受电压的变化率至少大于系统电源电压在过零点时变化率的 10% 时,在进行同步关合时不发生预击穿。

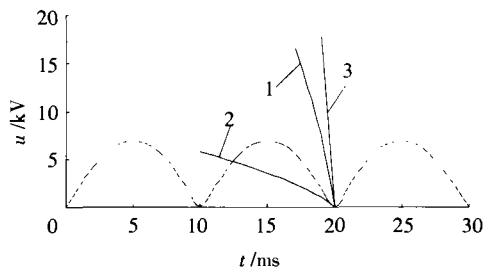


图9 真空断路器的关合速度与同步关合

应用式(1),结合真空断路器的关合动特性^[4],可以得出真空灭弧室断口间耐受电压随时间的变化,同时可以得出断路器的关合速度为多少时,可以实现同步关合。设系统电源电压为 $U=U_m \sin \omega t$,电压过零点时电压的变化率:

$$\left. \frac{dU}{dt} \right|_{t=0} = U_m \omega \quad (2)$$

触头间耐受电压可以表示为:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU}{dr} \cdot \frac{dr}{dt} \quad (3)$$

将式(1)和式(2)带入式(3)得触头间耐受电压:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU}{dr} \cdot \frac{dr}{dt} = 20\,230 r^{-0.3} \times v \Big|_{r=0} = 20\,230 v$$

式中: U 为系统电压的瞬时值 (kV), U_m 为系统电压的峰值(kV), ω 为系统电压的角频率, r 为触头之间的距离(mm), v 为断路器触头的关合速度(m/s)。

要使触头间耐受电压的变化率大于系统电源电压在过零点时变化率的 10%, 对于 10 kV 三相接地系统, 应有以下式子成立:

$$20\,030 v > 1.1 U_m \omega = (1.1 \times 12 / \sqrt{3}) \times \sqrt{2} \times 314 v > 0.17 \text{ m/s}$$

即对于 10 kV 三相接地系统, 当触头在关合瞬间的合闸速度大于 0.17 m/s 时, 触头间耐受电压的变化率大于系统电源电压在过零点时变化率的 10%。图 9 中的曲线 1,2,3 分别为断路器的关合速度 $v=0.17\text{ m/s}$, $v<0.17\text{ m/s}$, $v>0.17\text{ m/s}$ 时触头间的耐受电压随时间的变化。从图 9 中可以看出,在 10 kV 三相接地系统中,当断路器的合闸速度 $v \geq 0.17\text{ m/s}$ 时,曲线与电压波形无交点,即可以在电压 (下转第 90 页)

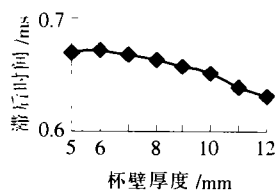


图 10 纵磁场滞后时间与杯壁厚度的关系

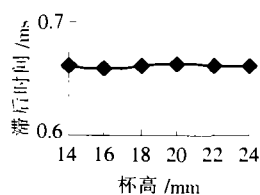


图 11 纵磁场滞后时间与杯高度的关系

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。