

基于 X 射线量变化评估真空灭弧室真空度的方法

李 炜¹, 郭媛媛¹, 王承玉¹, 龙西明², 高 晖², 刘伟荣³

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100086; 2. 陕西宝光集团有限公司, 陕西 宝鸡 721304;
3. 北京京东方真空电器有限责任公司, 北京 100016)

摘要: 为了找到一种操作简便且准确度高的方法来进行真空度评估, 笔者提出了一种不需外施磁场、利用测量 X 射线量变化来判断真空灭弧室内部真空度的方法。对于真空灭弧室在指定开距下施加工频电压时, 场致发射电子会以很高的速度从阴极表面逸出, 在触头间电场的作用下加速轰击阳极, 基于韧致辐射的原理会从阳极表面释放出 X 射线。这时, 真空度的差异会使产生的 X 射线释放强度以及变化情况有所不同, 因此, 利用测量释放的 X 射线量的变化可判断真空灭弧室内部的真空度。笔者通过理论分析, 得出了 X 射线量与真空度的关系, 并进行了试验验证。

关键词: 真空灭弧室; 真空度; X 射线

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)04-0315-04

Vacuum Estimation Method for Vacuum Interrupter Based on Variation of X-ray

LI Wei¹, GUO Yuan-yuan¹, WANG Cheng-yu¹, LONG Xi-ming², GAO Hui², LIU Wei-rong³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China; 2. Shanxi Baoguang Vacuum Electronic Device Co. Ltd., Baoji 721304, China; 3. Beijing Orient Vacuum Electric Co., Ltd., Beijing 100016, China)

Abstract: In order to find a simple and higher accuracy approach to estimate the vacuum state in a vacuum interrupter, a method utilizing X-ray variation without exerting outer magnetic field was presented. The Field emission electrons escape from cathode surface at very high speed and bombard the anode when the vacuum interrupter is under power frequency voltage with a designated gap length. Based on the bremsstrahlung principle, the X-ray is released from the anode surface with varying intensities due to different vacuum states. The relationship between vacuum and X-ray intensity is derived and verified with test results.

Key words: vacuum interrupter; Internal pressure; X-rays

0 引言

自从 20 世纪 70 年代起真空断路器以其优异的绝缘强度和熄弧能力以及无污染的特性开始得到了电力系统用户的青睐, 目前更是在中压领域占有主导地位。真空灭弧室作为其核心部件起着非常重要的作用, 对其研究主要集中在优化电场^[1-4]以提高击穿电压, 改善磁场^[5, 6]以提高大电流开断能力上。实际上, 真空度也是决定真空灭弧室开断性能的主要因素之一, 为了实现电流的分断和灭弧, 真空灭弧室内的压强应该不高于 1.33×10^{-2} Pa, 真空度的降低将直接影响真空断路器的开断性能。现在注意到, 真空开关经过多年的使用, 随着开断电流过程中触头材料产生气体的增多以及真空灭弧室本身微弱的泄漏

会造成灭弧室内真空度的降低。我们需要找到一种操作方法简便、准确度高的方法来对其真空度状况进行评估。

目前采用的方法主要有两种: 即工频耐压法和磁控放电法。两种方法虽原理简单、操作方便, 但都有其不足之处。工频耐压法只能发现严重漏气的灭弧室, 对于真空度高于 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ Pa, 甚至达到 1 Pa 的灭弧室虽然也可能通过工频耐压试验, 但实际上已失去开断短路电流的能力, 显然工频耐压法的判断精度很低, 对于处于临界状态的真空灭弧室将无能为力; 磁控放电法是利用正交的电场与磁场, 增加电子的运动行程从而达到增加其与灭弧室内残余气体分子的碰撞几率, 通过测量放电产生的离子流大小, 比较事先测定的该型灭弧室的真空度——离子流特性曲线, 定量得到真空度数值。每次放电后电

收稿日期: 2007-07-10; 修回日期: 2008-01-25

作者简介: 李 炜(1976-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压开关设备的研究及试验检测工作。

极表面对气体分子有吸附和脱附过程, 从而影响真空度发生改变, 造成测量重复性差的缺点。另外, 为了小型化的目的, 目前运行中大量使用的铠装移开式交流金属封闭开关设备, 大多采用固体材料包裹真空灭弧室结构, 励磁线圈根本无法安装, 磁控放电法也就不能采用。鉴于以上两种方法各自存在的不足, 就需有找到一种不需施加磁场线圈的测量方法达到判断灭弧室真空度的目的。国外从 20 世纪 80 年代末就在这方面做了很多研究, 提出的方法包括场致发射电流法^[7,8]、弧后发射电流法^[9]、高频预击穿电流法^[10]、高频电流开断法^[11]、发射电流衰减法^[12]、电弧电压法^[13]。比较这些不施加磁场的真空度测量方法后发现, 场致电流法不仅测量范围宽, 能够覆盖真空灭弧室的工作范围, 而且重复性也比较理想, 但限于当时的实验条件, 此项研究工作并没有继续深入开展下去。利用场致发射电流大小与所产生的 X 射线强度之间呈比例的特点, 将测量场致发射电流转化为测量 X 射线释放强度是笔者的创新之处, 根据该思路, 提出了一种真空度测量方法——X 射线量跟踪法。此方法的最大优势在于其测量仪器及人员与被测真空灭弧室之间没有直接的电气联系, 而且只需测量出 X 射线释放强度, 即可算出设备的真空度。实验结果表明, 此方法不仅测量范围大、重复性好, 而且具有极强的可操作性和安全性。

1 试验系统简介及准备

为了找到真空度与 X 射线释放强度之间的对应关系, 建立了一套真空比对系统。该系统由真空灭弧室(样品型号: BD390、BD392、BD395)、真空池、机械泵、分子泵、离子泵、进气阀、调节针阀、N₂ 气瓶和电离硅管组成(见图 1)。由于工业用真空灭弧室内的真空度一般能够达到 10⁻⁵ Pa 数量级, 而在使用中如达到 10⁻¹ Pa 数量级时则丧失开断短路电流能力, 所以试验中提供的真空度可调节范围在 10⁻⁵ ~ 10⁻¹ Pa 之间。试验前, 首先由机械泵、分子泵、离子泵依次连续对真空池抽真空, 使真空系统达到系统的极限真空度。使用 N₂ 气瓶通过进气阀对真空池放气来降低真空度, 当进气量与抽气量相平衡时, 真空池内的压强停留在某一要求值 P₀ 上, 因为灭弧室通过管道与真空池相连, 可以认为灭弧室内的压强即为该压强。此时关闭调节针阀和进气阀, 将电极按照要求设定为不同的开距(如 L=2、4、6、8 mm), 在灭弧室两端逐步施加工频电压直至 60 kV。这时, 触头表面的场致发射电子会以很高的速度从阴极表面逸出, 在加速电场的作用下高速轰击阳极, 由于韧值辐射的原理会从阳极表面释放出 X 射线, 当射线的强度大到一定程度后会穿透真空灭弧室的外壳。这时, 在距离灭弧室 1 m 处使用 X 射线剂量率仪测量释

放的 X 射线强度(见图 2), 纪录数值 Pd₀, 可获得一个标定点; 然后通过进气阀和针阀调节进气量可得到另一压强值 P₁, 重复上面程序记录另一个数值 Pd₁, 得到另一个标定点。依此类推, 可得到 X 射线释放强度与真空度的一组数据, 随后更换同型号真空灭弧室再次完成上述试验过程, 将多组数据统计处理后得到最终的对应关系曲线(见图 3、4)。实验结果表明, X 射线强度的数值重复性比较好, 且对于不同结构的管型 X 射线释放强度的变化规律基本一致(见图 5), 从而证实了这种关系的普遍性。

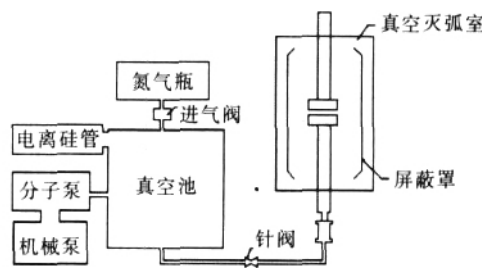


图1 真空比对系统

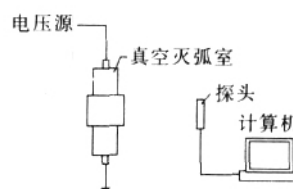


图2 X射线测量示意图

为了消除施压时由于触头表面局部电场不均衡而引起的微放电影响, 并且脱去表面吸附的气体分子层, 创造一致的初始场致电流发射条件, 可以采取在小开距下改善电极条件的办法。试验前, 首先对灭弧室在排气台进行 150 A 直流电流老炼^[14], 利用扩散型电弧对触头表面进行持续 2 s 的燃弧, 然后在指定开距下, 在高温烘烤的环境内进行 60 kV 并联电容电压老炼^[15], 持续时间约 10 min, 将触头表面的尖端、毛刺进行充分打磨, 使其光滑、洁净, 并且尽量脱去触头表面上吸附的气体分子层, 老炼过程中产生的气体通过真空泵除去, 避免重新蒸发到电极间再次被吸附。每记录完一组数据, 在重新调整真空度过程后, 再分别进行一次并联电容电压老炼处理。

2 试验结果及其分析

自由电子流速和加速电压是影响 X 射线发射剂量大小的主要因素。自由电子的速度越高, 运动中携带的动能就越大, 撞击电极时转化为光子的能量就越高, 而自由电子的速度取决于其在电场中受到的电动力大小, 或者说电场强度大小。试验中发现: 在不同触头开距下, 外施电压的大小与产生 X 射线释放强度的对应关系基本一致, 只是随着开距的减小 X 射线强度在增加(见图 3)。

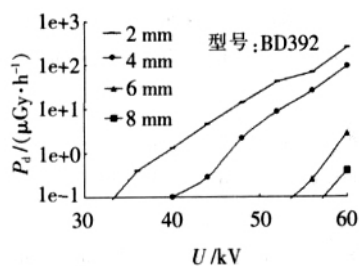
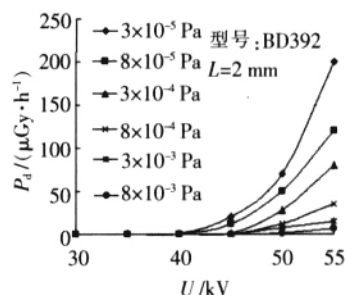


图3 不同开距下X射线释放强度与外施电压的关系

为了得到尽可能明确的试验数据,则希望产生的X射线强度较大,即获得较大的场致发射电流。获得场致发射所必须的强电场不但可以靠提高极间的电压,更有效的办法是减小极间距离。于是将触头开距减小至2~3 mm,在这个间距条件下,施加的电压与测到的场致发射电流关系非常密切^[16]。但是这样一来,阴极表面电场就相对变得不均匀:即在微小的凸起处电场更强,而在凹下之处电场稍弱。由于发射随电场强度的增大而剧烈的变大,所以阴极发射实际上基本由凸出之点供给。这样的话,只有进行充分的老炼和脱附处理才尽可能能够创造一致的场致发射条件。

在改变真空度、测量X射线的过程中发现:在真空度较高的阶段(如 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ Pa之间),释放的X射线强度随着真空度的变差而减小(见图4),且在某一真空度下X射线的释放强度比较稳定,均匀地分布在一定范围内。这种随着真空度改变带来的X射线释放强度变化和磁控放电法中测量到的离子流变化趋势刚好相反,根据磁控放电法的原理,在高真空度下,当自由电子螺旋前进时,与间隙内残余气体分子碰撞的机会少,所以电子被气体分子捕获成为离子的数目就少,测到的离子流就小;反之,真空度低时,离子流数值就大。分析在该试验中出现的X射线变化情况的原因:可能是在高真空度下气体分子的间距比较大,由于电子自由程很长(达到几千米),所以几个甚至几十万个电子飞跃电极时,平均才只有一、二个电子遭遇碰撞。而且,场致发射电子的飞行轨迹又是直线,更加减少了电子与气体分子发生碰撞的概率,电子在加速电场的作用下能够持续获得很大的能量,以非常高的速度沿着电场方向轰击阳极,释放出较强的X射线。随着真空度的降低,这种碰撞机会逐渐增多。尽管大部分电子在与气体分子发生弹性碰撞后,在加速电场的作用下会继续沿电场方向飞行,最终射向阳极,可仍会有一部分电子经与气体分子发生非弹性碰撞,通过附着过程和复合过程被气体分子捕获成为带电离子,导致射向阳极的电子数在减小。通常,真空度愈低,复合的几率就愈大^[17],射向阳极的电子数目就减少;而且,随着非弹性碰撞次数的增加,损失的动能也在增加,从而导致撞击阳极的电子能量下降,产生的X

射线释放强度也就在相应减少。

图4 X射线释放强度 P_d 与真空灭弧室内真空度的关系

当真空度下降到一定阶段时($10^{-2} \sim 10^{-1}$ Pa之间),这种变化规律就突然失去了(见图5)。发生的现象是释放的X射线强度骤变,并且持续快速波动,振幅也很不稳定。分析产生这种现象的原因,可能是随着真空度的下降,电极间气相分子数的增加,电极表面的吸附作用也在增强,当吸附作用大于脱附作用时,则分子吸附层开始逐渐变厚。带来的结果是场致发射电子撞击阳极时不易与金属原子直接碰撞,减小了发生韧致辐射的概率,这时从阳极逸出的X射线非常少。然而,当场致发射电子撞击到阳极吸附的气相分子时会伴随着粒子交换过程:即1个场致发射电子撞击气体分子会产生A个正离子和C个光子(属于特征X射线,能量很低,不会穿透屏蔽罩和灭弧室外壳),而当正离子和光子抵达阴极时,又导致阴极释放出二次电子,假定一个正离子产生B个电子,一个光子产生D个电子,这样,1个场致发射电子会产生 $AB+CD$ 个二次电子。如此循环,就使电子流不断增长。这种雪崩式增长的电子(包括初始电子和二次电子,甚至三次、四次电子的总和)在加速电场的作用下撞击到阳极时,发生的瞬时韧致辐射可能会非常强,这时逸出的X射线会非常大。由于碰撞电极的电子数目是随机的,最终呈现出的结果就是X射线释放强度时大时小非常不稳定,并且在快速波动变化。

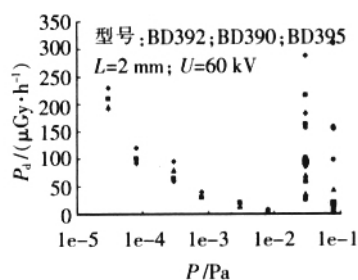


图5 不同真空度下X射线释放强度的分布

3 结语

在真空灭弧室内压强范围为 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ Pa之间时,释放的X射线强度随着真空度的变差而减小,而且在每个真空度下的值均能保持稳定;在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ Pa的范围内,X射线释放量出现骤变波动现象,

且变化频率、幅度很大。故通过检测 X 射线强度的变化可以达到评估灭弧室内真空度的目的,一旦出现波动则说明真空度处于临界状态,应该考虑更换灭弧室。

参考文献:

- [1] 杨家福. 原子物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [2] 刘 韬, 马志瀛. 高压真空灭弧室内电场分布的影响因素[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 136-139.
- [3] 闫 静, 马志瀛. 高电压等级真空灭弧室绝缘结构的研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(6): 6-8.
- [4] 修士新, 王季梅. 真空灭弧室的耐压特性及其分析[J]. 高电压技术, 1997, 23(2): 46-48.
- [5] 贾申利, 王季梅, 付 军, 等. 一种高开断能力两极纵向磁场电极结构的真空灭弧室 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(5): 330-335.
- [6] FINK H, HEIMBACH M, SHANG Wen-kai. Vacuum Interrupters with Axial Magnetic Field Contacts Based on Bipolar and Quadrupolar Design [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2001, 29(5): 738-743.
- [7] WALCZAK K, JANISZEWSKI J, MOSCICKA-GRZESIAK H. Evaluation of Internal Pressure of Vacuum Interrupters Based on Dynamics of Electron Field Emission Current and X-radiation [C]// High Voltage Engineering Symposium, 1999: 192-195.
- [8] WALCZAK K. Method for Vacuum State Evaluation Based on Analysis of Dynamics Changes of Electron Field Emission

Current and X-radiation in Time[C]// International Symposium on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, 2002: 231-234.

- [9] FRONTZEK F R, KONIG D. The Measurement of Emission Currents Immediately after Arc Polishing of Contacts[J]. IEEE Trans. on Elec. Ins, 1993, 28(4): 700-705.
- [10] KONIG D, HEINEMEYER R. Prebreakdown Current of Vacuum Tubes with Increased Pressure Stressed with AC Voltage [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1989, 24(6): 937-941.
- [11] FRONTZEK F R, KONIG D. Electrical Methods for Verifying Internal Pressure of Vacuum Interrupters after Long Time Service[J]. IEEE Trans on Elec. Ins, 1993, 28(4): 635-641.
- [12] 赵子玉, 宋焕生, 江秀臣, 等. 一种测量真空开关灭弧室真空度的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 144-149.
- [13] MERCK W F H, DAMSTRA G C, BOUWMEESTER C E, et al. Methods for Estimation of the Vacuum Status in Vacuum Circuit Breakers [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(4): 400-404.
- [14] 杨兰均, 王宝利, 张文元. 真空灭弧室电压老炼新技术研究[J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 88-90.
- [15] 姚士彬. 电压和电流老炼对真空灭弧室质量的影响 [J]. 高压电器, 2000, 36(6): 52-55.
- [16] 叶 凡. 根据微放电现象的研究评价真空灭弧室触头材料的性能[J]. 电工合金, 1999(1): 39-42.
- [17] 胡汉泉, 王 迁. 真空物理与技术及其在电子器件中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.

(上接第 314 页)

(2) 采用屏蔽盒、回绕线和双层屏蔽绞线传输互感器信号, 减少互感器工作环境中的杂散电磁场干扰;

(3) 设计的电流互感器具有准确度高、范围宽, 一台互感器同时满足 IEC 60044-8 对测量 0.2 级和保护 5P20 级电子式电流互感器准确度要求。

参考文献:

- [1] IEC 60044-8. Instrument Transformers-part 8: Electronic Current Transformers[S]. 2002.
- [2] 罗苏南, 田朝勃, 赵希才. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 108-113.
- [3] 郭柳艳, 游大海. 新型电子式电流互感器测量精度分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 27-29.
- [4] 郭晓华, 朱明钧. Rogowski 线圈工业化应用中若干问题的讨论[J]. 高电压技术, 2003, 29(3): 16-17.
- [5] 邱红辉, 段雄英, 邹积岩. 基于数据融合的组合结构电子式电流互感器设计[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 14-20.
- [6] 王 鹏, 罗承沐, 张积新. 基于低功率电流互感器的电子式电流互感器[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 98-101.

- [7] E DDY S O, DJOKIC B. An Optically Isolated Hybrid Two-stage Current Transformer for Measurements at High Voltage[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(4): 1204-1207.
- [8] LUXA A H, MUELLER A B, NOBLE T J. Sensors and Non-conventional VT and CT for Medium Voltage Switchgear [C]// Trends in Distribution Switchgear, 1998: 10-12.
- [9] DONALDSON E F, GIBSON J R, JONES G R. Hybrid Optical Current Transformer with Optical and Power-line Energisation[J]. IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib. 2000, 147(5): 304-309.
- [10] IEEE PC37.235. Guide for the Application of Rogowski Coils Used for Protective Relaying Purpose [S]. 2006.
- [11] IEEE PC37.92. Standard for Analog Inputs to Protective Relays from Electronic Voltage and Current Transducers[S]. 2005.
- [12] 程利军. 微机继电保护装置电磁兼容研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2001.