

真空断路器容性电流开断及弧后重击穿现象

Capacitive Current Switching and Restriking of Vacuum Circuit Breakers

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室) 杨和 孙丽琼 刘志远 耿英三
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University)
Yang He Sun Liqiong Liu Zhiyuan Geng Yingsan

[摘要]中压配电系统中真空断路器广泛应用于投切电容器组。关合过程中会产生高频率涌流,其预击穿电弧会烧蚀触头表面并使触头发生熔焊;开断电容器组时,开断电流只有几百 A,但是熔焊区会形成微突起甚至于破裂,触头两端会承受容性恢复电压 $U_m(1-\cos\omega t)$,其峰值会达到 2 倍系统电压 U_m (开断单相电容器组),这使真空断路器弧后偶尔会发生重击穿,甚至于开断电流过零几百 ms 后会发生延时重击穿现象。其原因与投切过程产生的高频涌流,开断电流,恢复电压密切相关。目前对击穿机理主要有两种解释:场致发射引发重击穿和微粒导致重击穿。

[Abstract] Vacuum circuit breaks are now widely used for capacitive switching in medium voltage distribution system. The connection of capacitive loads leads to inrush currents of high frequency, of which the pre-ignition arcs are able to melt the contact surface and form micro-welds. The interrupting currents are only several hundreds of amperes. When the contacts are opened, the micro welds are ruptured and tips are left on the contact surfaces. After current zero Vacuum circuit breaks are stress by a recovery voltage of " $U_m(1-\cos\omega t)$ " which reaches twice the peak value U_m of the system voltage. It makes restrike occur occasionally even hundreds milliseconds later after current interrupted. The mechanisms related to restriking are field emission initiated breakdown and micro particle initiated breakdown.

[关键词]真空断路器;高频涌流;容性开断;恢复电压;重击穿

[Key Words] Vacuum circuit breaker; inrush current; capacitive switching; recovery voltage; restrike

1 引言

电网运行过程中容性电流开断主要有空载架空线,电缆和电容器组。其中投切电容器组对真空断路器是一项频繁的操作任务。虽然容性开断电流很小(几百 A 量级),但由于开关两端的直流恢复电压 $U_m(1-\cos\omega t)$,偶尔会引起弧后重击穿,甚至在电流过零几百 ms 后会发生延时重击穿,重击穿产生的过电压会损坏开关本身及其它电力系统设备^[1]。

在无功补偿运行过程中,40.5kV 真空断路器早期运行重击穿概率>5%^[2]。但是容性开断的恢复电压峰值却远低于真空灭弧室设计时的工频耐压值和冲击耐压值^[3],至于引发容性开断重击穿的原因目前还在研究探索中。因此有必要对容性电流开断的物理过程进行深入了解和分析,提高真空断路器容性电流开断能力。

2 弧后重击穿机理研究

目前,容性电流开断是真空断路器运行最严峻的任务之一,因为关合电容器时会出现涌流,频率会达到几百 Hz 到几千 Hz,幅值比电容器正常工作电流大几倍到几十倍。其预击穿电弧会局部性地烧蚀和熔化触头表面;当触头拉开时,已熔焊的熔区会产生微突起,由此就存在了一定的弧后重击穿可能性^[4,5]。而且开断过程中由于熔区金属微粒的喷发和熔焊区的破裂,触头表面会出现微粒,从而引发重击穿^[8,9]。

至今,对容性电流开断弧后重击穿的机理研究还没有一个公认的结论。许多研究^[4-9]表明主要由两点原因导致重击穿:(1) 主要由场致发射引起的重击穿,(2) 主要由微粒引发的重击穿。

2.1 场致发射引起重击穿

触头表面情况是决定真空断路器绝缘特性的主要因素之一。在投切电容器组时,预击穿出现的高频涌流,负载开断电流以及其他作用会直接影响触头表面状况。

容性开断触头合分闸物理现象研究:(1)当触头闭合时,预击穿电弧弧根会局部熔化触头表面,形成微熔焊区;(2)当触头再次拉开时,微观焊接点断裂会产生微突起,同时形成真空电弧的第一个阴极斑点。根据开断电流的幅值以及电弧持续时间,这些突起的焊接点会被完全消蚀掉或部分破裂仍然留在触头表面。最坏的情况是容性开断电流很小,微观焊接处的破裂会成为重燃或重击穿现象的起源^[4,5]。

因此,关合电容器出现的高频涌流是影响真空断路器容性电流开断能力的关键因素。文献[4,5,8,9]分别对不同触头材料和触头结构的预击穿电场进行了试验研究,对试验数据进行统计分析,得出了一致的预计穿电场强度累积概率分布曲线;并且 Komer^[8]认为该累积概率曲线是符合威布尔分布,如图 1 所示。

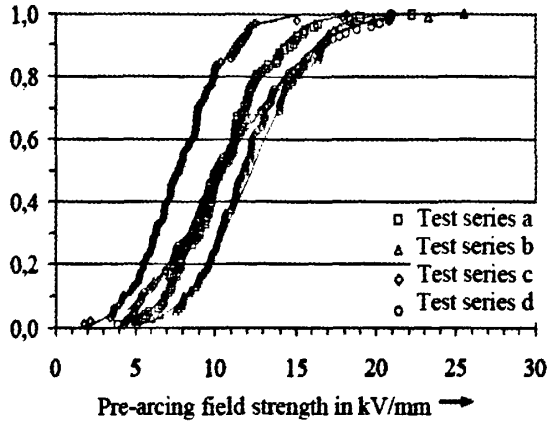


Fig.1 cumulative frequency and weibull distribution function of pre-arcing field strength in test series a through d^[8]

图 1 试品 a 到 d 的预击穿场强的累积概率 weibull 分布^[8]

通过试验研究, Dullni 等人^[5]认为容性电流开断后重击穿现象主要是由场致电子发射引起的:

(1)预击穿电场累积概率分布 $P_{pre}(E, d_0)$ 和恢复电压峰值时刻发生重击穿的概率 $R_{re}(U, d_0)$ 具有一致相关性, 如公式 1、2 所示。

$$P_{pre}(E, d_0) = \frac{1}{N_{tot}} \int_0^E \frac{\delta N(U_0 / d_{pre})}{\delta E} dE \quad (1)$$

$$R_{re}(U, d_0) \approx P_{pre}\left(\frac{\hat{U}_{re}}{d_0}, d_0\right) \quad (2)$$

预击穿是在触头闭合过程产生的, 平均预击穿电场强度在 5-7kV/mm, 其对应的触头间距离平均为 3-4mm。这可假定预击穿的产生是小开距下场致发射引起的, 而预击穿电场累积概率分布 $P_{pre}(E, d_0)$ 和重击穿概率 $R_{re}(U, d_0)$ 的相关性证明了重击穿是场致发射引起的。

(2) 重击穿和预计穿发生在触头表面同一区域, 如图 2 所示, 其中图 2(a)为触头关合时的预击穿过程, 图 2 (b)为触头分离后发射中心发出光, 图 2(c)为重击穿发生于相同位置。若是微粒引发的重击穿会随机发生于整个表面触头表面。

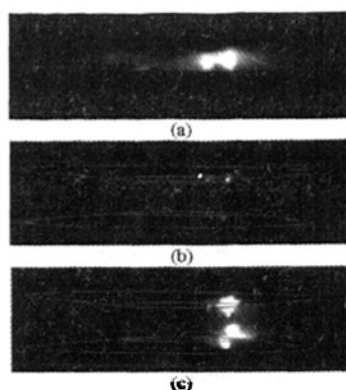


Fig.2 Sequence of snapshots taken from a vacuum interrupter with transparent enclosure : a) during the pre-ignition, b) after contact separation showing light from emission centres, and c) during a late restrike at same position. Contact contours are depicted schematically^{[5][10]}.

图2 真空灭弧室中电弧的快速摄影仪照：(a)预击穿过程 (b)触头分离后发射中心发出光 (c)重击穿发生于相同位置^{[5][10]}。

(3) 相同电压等级下，重击穿依赖于触头距离。图3表明重击穿概率随着开距的减小而增大；随着试验次数的增加，100-200次时，重击穿加速上升。

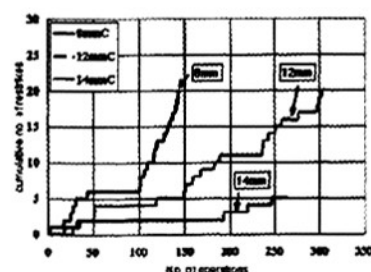
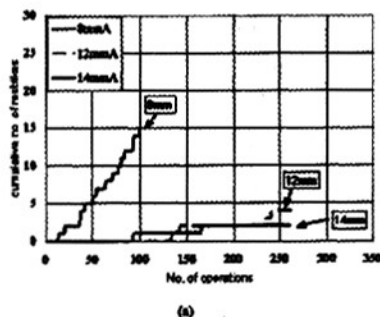


Fig.3 The cumulative number of restrikes versus number of operations at different contact distances 8mm, 12mm,14mm for test interrupter A (a) and for C (b)^[5]

图3 两种试品 A, C 在开距 8mm, 12mm, 14mm 时的重击穿累积次数^[5]

2.2 微粒引发重击穿

在真空灭弧室的设计过程中，触头表面始终会残留微粒，由于真空电弧的作用，更多的微粒会产生，这直接影响了真空间隙的重击穿过程^[3]。在投切电容器组过程中，当触头闭合时，由于预击穿电弧局部加热作用触头表面会发生熔焊，然后触头被强迫拉开时，熔焊区会破裂，微粒和大量大突起就会在触头表面形成，另外通过高速摄影可以观察到微粒逃离触头间隙的情况^[8]。同时机械振动和冷焊接也会使得微粒在整个触头表面产生^[11]。

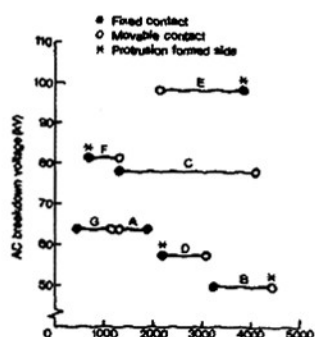


Fig. 4 relationship between field enhancement factor and AC breakdown voltage^[11]
图4 场致增强因数和交流击穿电压之间的关系^[11]

Kamikawaji 等人^[11]通过试验证明在容性电流开断过程中, 场致增强系数 β 与交流击穿电压之间没有任何联系, 如图 4 所示, 若重击穿是因为场致发射引起的, 击穿电压应该与 β 值成反比的关系, 而结果表明低的 β 值却会带来低的击穿电压。由此可见引发重击穿的主要因数是微粒。

微粒导致击穿可分为 3 个典型情况:

- (1) 当恢复电压加的很高时, 微粒单向飞行碰撞在另一电极上, 由微粒碰撞导致了重击穿, 这主要发生在恢复电压峰值附近。
- (2) 当恢复电压很低时, 微粒在恢复电压第一个峰值开始运动这样微粒就会在电压作用下来回运动多次, 击穿就会发生在第一个峰值以后。Latham^[12]假设当微粒累计到一定能量时就会发生击穿。
- (3) 对于延时重击穿, 他们认为是微粒间相互作用引起的。

Schlaug 等人^[6,7]认为引发延时重击穿的原因主要是微粒, 他们将 18 只结构相同的真空灭弧室试品分为两组: 9 只经过完全老练, 另 9 只经过部分老练。然后进行了雷电冲击和 1min 工频耐压两种绝缘耐压试验, 最后全部试品进行他们自己设计的低能量开断试验。试验数据如图 5, 经过完全老练的试品冲击耐压值和工频耐压值明显较高, 而延时重击穿的概率是在测量误差范围内相等的。这说明延时重击穿是由介质击穿以外其他原因引发的, 那就可以联系到微粒的出现。

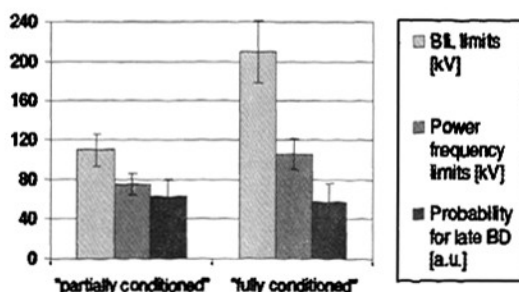


Fig.5 Dielectric and late breakdown performance of partially and fully conditioned interrupters^[7]
图5 部分老练和完全老练灭弧室的介质绝缘能力和延时重击穿表现^[7]

3 影响真空击穿因素

(1) 触头类型

不同类型触头因其磁场对电弧的控制不同, 会直接影响预击穿过程以及电弧对触头的烧蚀程度。螺旋式触头在预击穿发生过程中因横向磁场作用使得预击穿电弧烧蚀范围更大, 触头表面烧蚀区较浅; 而平板触头无磁场控制作用, 触头表面烧蚀区域很集中并较深, 如图 6^[8] 所示。

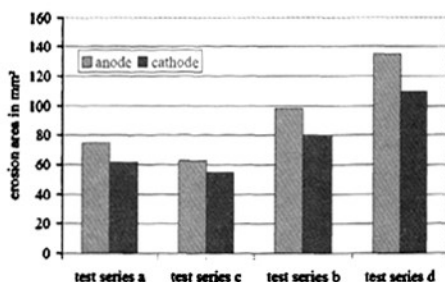


Fig. 6 Erosion area of anode and cathode contact^[8]

图6触头阳极和阴极的烧蚀面积^[8] (a平板式CuCr75触头 b螺旋式CuCr75触头 c平板式CuCr25触头 d螺旋式CuCr25触头)

研究表明延时重击穿概率会随着触头开距和触头半径的增大而明显下降, 主要由 2 点原因: 1 开距的增大使得电场强度降低, 减少了场致发射^[5]; 2 触头间内部空间的增大使得微粒的碰撞可能性下降^[7]。保持其它条件相同时, 通过比较同样形状触头在开槽和不开槽, 得到触头开槽后重击穿概率较高。因为触头开槽后电场强度尤其是触头边角和触头外围电场强度增加, 将导致触头间的电子发射和放电, 从而容易导致击穿^[13]。

(2) 触头材料

触头材料对真空触头间隙的耐压水平有重要影响, 一般认为提高材料的硬度或机械强度有益于提高耐压水平, 并且阴极材料性质主要影响短间隙击穿, 阳极材料主要影响长间隙击穿^[16]。Yokokura 等人^[14]分别测试了 CuCr, CuW, CuTeSe, CuBi 四种触头材料的重击穿特性: CuCr, CuW 有着相似梯度, 且远远小于 CuTeSe, CuBi, 如图 7。因此他们认为 CuW 是容性开断中的良好的备选触头材料。

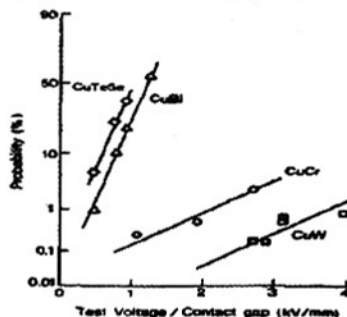


图 7 Restriking Probability for Different Contact Materials^[14]

图 7 不同触头料重击穿概率^[14]

在使用相同的触头材料时, 触头表面的污秽、表面微凸和粘附的微粒, 均对击穿电压有影响。通过老炼可以消除表面的微粒、胡须、表面吸附气体及其它污染物, 并且能细化并均匀表面组织结构, 有利于削弱微粒迁移放电、表面微放电, 减少场致发射。

(3) 合分闸速度及分闸缓冲

合闸速度太大会减少波纹管寿命; 速度太小则增加预击穿时间, 加剧触头烧损; 分闸速度太慢, 灭弧室介质恢复速度不够, 燃弧时间增加, 也易重击穿; 速度太快则容易反弹^[3]。

缓冲不良会引起触头反弹, 是触头有效开距变小, 断口间的恢复电压高, 容易重击穿, 切合电容器组时此现象尤为突出^[3,19]。

4 讨论

真空断路器容性电流开断能力关键决定于触头表面情况。试验表明高频涌流预击穿电弧会局部烧蚀触头表面以及使触头发生熔焊, 当触头打开时熔焊区域会形成各种微突起甚至破裂产生微粒留在触头

表面,使触头表面情况恶化^[4,5,8,9]。容性开断电流能够老练消除部分突起,但由于开断电流幅值很小(几百A),老练效果会减弱^[8],研究发现开断电流为零对试样进行容性开断试验是最苛刻的^[4,5]。最后在容性恢复电压的作用下真空断路器偶尔会发生重击穿现象。

对于真空断路器容性电流开断弧后重击穿现象的机理目前主要有2种解释:(1)场致发射引发重击穿,(2)微粒导致重击穿。而Kroner等人^[8,9]认为在第1个恢复电压周期内,重击穿是由电场上升造成的;在2-8个周期内主要由触头表面释放的微粒引发了重击穿;在后面的恢复电压持续时间内,两种因素的相互作用使得重击穿偶尔发生于电流过零几百ms后。

目前40.5kV真空断路器难以通过容性开断试验,为提高40.5kV真空断路器开断电容器组的能力,目前国内外均采用两个真空灭弧室串联使用提高其开断能力,例如用2个14mm开距的真空灭弧室相串,其绝缘耐压能力较一个28mm开距的灭弧室能提升40%,这是因为两个灭弧室有着独立的重击穿概率,而且击穿概率与触头行程是不成线性关系^[4,11]。

5 结论

由上述可知,容性电流开断弧后重击穿机理还处于探索和研究中,导致重击穿的原因主要有2点:(1)主要由场致发射引起重击穿^[4,5],(2)主要由微粒引发重击穿^[8,9]。另外,有研究指出恢复电压第1个周期内重击穿是由电场上升造成的,2-8个周期内由微粒引发重击穿,两种因素相互作用使得重击穿发生于几百ms后^[6,7]。

很显然真空断路器容性开断能力主要决定于触头表面状况。高频涌流会局部烧蚀触头表面,使得触头闭合时发生熔焊,而触头拉开后会在表面形成微突起,同时部分突起在开断过程中会破裂产生微粒,这对会严重影响真空绝缘性能。同时影响重击穿概率的因素很多,如触头结构、真空度、合分速度等等。因此,只有真正了解容性开断重击穿机理,才能进一步指导真空断路器的设计来提高容性电流开断能力。

参考文献

- [1] R. P. P. Smeets, A. G. A. Lathouwers, "Capacitive Current Switching Duties of High-Voltage Circuit Breakers: Background and Practice of New IEC Requirements", *Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Singapore, Vol. 3, pp. 2123-2128, 2000
- [2] 李电. 真空断路器投切电容器组早期重击穿率的研究. *高电压技术*. 2002, 28(9): 22-23.
- [3] P. G. Slade, *The Vacuum Interrupter Theory, Design and Application*. Boca Raton, London, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008, pp.43-61, pp.369-371
- [4] E.Dullni, D. Gentsch, I. Kleberg, K. Niayesh, W. Shang, "Switching Capacitive Currents", *Proc. 21st ISDEIV*, Yalta, pp. 407-40, 2004
- [5] E. Dullni, D. Gentsch, I. Kleberg, K. Niayesh, W. Shang, "Switching of Capacitive Currents and the Correlation of Restrike and Pre-ignition Behavior", *IEEE Trans. on Dielectr. and Electrical Insulation*, Vol. 13, No. 1, pp. 65-71, 2006
- [6] M.Schlaug, L.T.Failkingham, "Non-sustained disruptive discharges (NSDD) – a new investigation method leading to increased understanding of this phenomenon", *XIth ISDEIV*, pp490-494, Xian, 2000
- [7] M.Schlaug, L.Dalmazio, U.Ernst, X.Godechot. S.Kantas, C.Triaire, "Late Breakdown Phenomena in Vacuum Interrupters", *XXIII-rd ISDEIV*, pp247-250, Bucharest, 2008
- [8] F. Körner, M. Lindmayer, M. Kurrat, D. Gentsch, "Switching Behavior of Different Contact Materials under Capacitive Switching Conditions" *23th ISDEIV*, Bucharest, pp.202-205, 2008.
- [9] F. Körner, M. Lindmayer, M. Kurrat, D. Gentsch "Contact Behavior in Vacuum under Capacitive Switching Duty", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 14, Issue 3, pp. 643-648, June 2007
- [10] K. Niayesh, F. Rager and C. Schacherer, "Electrode phenomena before long delayed breakdowns in vacuum after switching capacitive currents", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol.33, No.2, pp258-259, April 2005
- [11] T. Kamikawaji, T. Shioiri, T. Funahashi, Y. Satoh, E. Kaneko and I. Ohshima, "An investigation into major

- factors in shunt capacitor switching performances by vacuum circuit breakers with CuCr contacts”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vo.8, No.4, pp.1789-1795, October,1993.
- [12] R. V. Latham, "Microparticle Charge Acquisition and Reversal at Impact", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 5, WM241-0. 2044-54, 1972.
- [13] Hans Schellekens. Capacitor bank switching with vacuum circuit breakers. XXIII-rd Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2008
- [14] K. Yokokura, M. Matsuda, K. Atsumi, T. Miyazawa, S. Sohma, E. Kaneko, I. ohshima "Capacitor Switching Capability of Vacuum Interrupter with CuW Contact Material", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.10, No.2, pp.804-810, April 1995.
- [15] 李电, 金百荣等. 真空断路器投切电容器组性能现状与对策. 2003 年电力电容器学术论文集,2003: 109-113.
- [16] 王季梅. 真空开关理论及其应用. 西安交通大学出版社, 1986.

真空断路器容性电流开断及弧后重击穿现象

作者: 杨和, 孙丽琼, 刘志远, 耿英三

作者单位: 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_7192679.aspx