

研
究
开
发高速列车过分相段下真空断路器的
电 寿 命 研 究

李天鹭, 吴广宁, 欧阳乐成, 高国强, 王万岗

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)



作者简介: 李天鹭 (1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为铁道高电压与绝缘技术。

摘 要: 针对高速列车真空断路器 (VCB) 在列车运行中处于频繁开断的状态, 开断过程中电弧反复烧蚀触头产生尖端、毛刺、金属蒸汽, 扩散的金属蒸汽又使灭弧室真空度降低, 首次提出了通过测量 VCB 在分断不同次数正常电流下接触电阻表征其电寿命的试验方法, 并得到了不同分断次数下耐受冲击电压和工频工作电压的特性。研究表明: VCB 初期接触电阻随分断次数增加而增加, 之后接触电阻基本保持不变; 在 VCB 使用初期瞬态恢复电压不能导致电弧重燃, 长期工作后可能导致电弧多次重燃, 但即使长期工作后工频工作电压仍不能击穿灭弧室。

关键词: 真空断路器; 电寿命; 高速列车; 过分相; 接触电阻; 电接触

中图分类号: U264.3⁺5; U292.91⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)04-0026-04

Electric Life of Vacuum Circuit Breaker Considering High-speed Trains
Passing Neutral Sections

LI Tian-zhi, WU Guang-ning, OUYANG Le-cheng, GAO Guo-qiang, WANG Wan-gang

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: For the vacuum circuit breaker (VCB) breaking frequently in high-speed railway, contacts were repeatedly corroded, and tips, coarsenesses and reduction of vacuum degree of diffusing metal vapor were caused by arc during breaking. The experimental program was proposed of characterizing VCB electric life by measuring contact resistance of normal current under different breaking number. Meanwhile, the characteristics of withstanding impulse voltage and frequency voltage under different breaking number were obtained. Studies have shown that the contact resistance was initially increasing with the increase of breaking number, and after that, contact resistance was unchanged; in the initial testing period, the transient recovery voltage could not cause reignition of arc, but multiple reignitions of arc would happen possibly with working in a long term, although the gas of interrupter could not be breakdown by working-frequency voltage.

Key words: vacuum circuit breaker; electric life; high-speed train; passing neutral section; contact resistance; electric contact

0 引言

高速列车高压真空断路器 (VCB) 是列车供电保护的关键设备, 承担着列车过分相分合受电弓电路, 切断故障电流、短路电流的作用, 对机车安全稳定运行起着重要作用。

以 CRH₂ 型动车组为例, 每列有 2 台 CB201 型真空断路器, 每台断路器各控制 1 台车载牵引变压器。2 台 VCB 分别安装在 2 号和 6 号车底架下的高压设备箱内, 用来开断和接通 25 kV 电路, 并作为故障情况下的保护器件,

在牵引变压器牵引侧电路发生故障时能迅速、准确可靠地切断电路^[1]。

由于铁路系统采用分相供电, 在高速列车通过分相段前, 真空主断路器会断开, 将列车主电路同受电弓、接触网分离, 通过分相段后真空主断路器又重新闭合。通常, 车载 VCB 在作为保护器件工作, 切断短路电流和故障电流方面发生的概率很低, 其开合基本上都是在列车过分相时发生或作为主电路分合总开关动作时发生, 主要电寿命损耗也是在这 2 种情况下开断、闭合时产生的。由于车载 VCB 处于频繁开合的状态, 此外受线路操作过电压、雷击过电压的影响, 断路器常承受过电压、过电流的冲击作用, 这些特殊工况使得

收稿日期: 2012-02-07

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目 (2007J036)

车载 VCB 的寿命特性与电力系统普通 VCB 存在很大的差异。目前对 VCB 电寿命的研究主要是停留在电力系统领域。国内外断路器生产厂家一般用断路器累计开断短路电流的 kA 数或累计开断额定开断电流的次数来标定电寿命。大量的断流容量试验和现场运行的经验表明, 影响电寿命的主要因素是触头的磨损^[2]。

因为 VCB 用作列车总开关与司机操作习惯有关, 又缺少统计数据, 所以本文针对 CRH₂ 型动车组真空主断路器过分相段的开合进行电寿命试验研究, 试验模拟了列车过分相段时车载 VCB 在多次开断过程中触头的电磨损和灭弧室介电强度的变化, 提出了以通过测量接触电阻来表征 VCB 电寿命的方法, 并经过多次测量得到不同分断次数下的接触电阻值。由 MATLAB 仿真列车过分相段, VCB 断开时两端电压突变情况, 用幅值、时间与瞬态恢复电压近似的方波脉冲进行 VCB 冲击耐受电压试验, 并通过仿真分析得出了 VCB 灭弧室经过长期工作后电磁场分布变化的情况, 得到了车载 VCB 接触电阻、耐受冲击电压、耐受工频电压之间的关系。

1 静态接触电阻的测量

1.1 试验装置

与真空断路器触头磨损有关的主要因素是开断电流的大小和燃弧时间的长短, 即电弧能量, 文献[3-5]中提到多次开断电弧用累计电弧能量来衡量断路器电寿命。实际应用中燃弧时间的准确测量存在一定的困难, 燃弧时间的长短是不确定的, 但多次开断相同大小的电流, 得到的平均燃弧时间是基本一致的^[6], 即电寿命可由断路器开断次数和开断电流大小决定, 与线路中供电电压等因素无关^[7]。在 VCB 闭合时, 两个端子间的电压值为额定电流与 VCB 主电路电阻的乘积。按照图1所示, 采用 220 V 交流调压电源等效试验, 在车载 VCB 两个端子上施加工频电压, 控制负载参数保证流过 VCB 的电流为 AC 200 A, 模拟工况下流过 CB201 型车载真空断路器的电流。控制 VCB 在测试回路中, 分断频率设定为 0.1 Hz。每分断 5 000 次后测试一次真空断路器闭合时主电路电阻, 并计算出接触电阻值。接触电阻测试仪与 VCB 两个端子相连, 施加 DC 100 A 电流流过 VCB 主电路, 测得主电路电阻值, 且接触电阻值可近似等于接触电阻测试仪测得值减去附加部件电阻值。

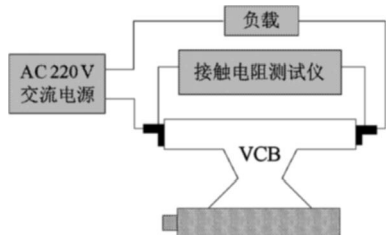


图1 VCB 接触电阻的测量

1.2 试验结果分析

图2为模拟列车过分相, VCB 经多次分断过后得到的接触电阻变化曲线。在车载 VCB 未经过分断之前, 由于触头表面氧化膜的存在, 测得接触电阻为 224 $\mu\Omega$, 1

万次分断后氧化膜磨损, 接触电阻下降到 98 $\mu\Omega$, 4 万次分断后测得接触电阻又迅速增加到 405 $\mu\Omega$, 之后的增加速率变低但是直到 12.5 万次分断之前接触电阻值仍持续增加, 经过大概 12.5 万次分断过后接触电阻值保持在 783 $\mu\Omega$ 左右, 不再继续上升。由于流过 VCB 的电流为交流 200 A 左右, 在灭弧室分断触头时电弧表现为扩散型, 阴极表面上出现运动着的互相排斥不均匀阴极斑点, 每个斑点载流 50~100 A, 阴极斑点致使阴极触头的电磨损严重^[8]。阴极斑点表面和阳极之间充满了等离子体, 阴极上分散的小电流在阳极上聚集, 形成金属离子的转移, 导致接触电阻在触头分断 2 万次后升高^[9]。

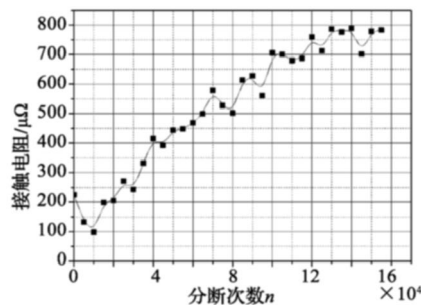


图2 接触电阻变化曲线

静态条件下触头间流过额定电流时, 影响接触电阻的因素主要是接触材料、接触力、触头形变类型, 计算公式如下^[10]:

$$R_j = K(0.102F)^m \quad (1)$$

式中: F ——接触压力; m ——触头形变系数; K ——接触材料系数。

同一款 VCB 的材料相同, 多次闭合过程中接触压力趋近不变。 m 与接触面的形变情况有关, 当面接接触时 $m=1$, 线接触时 m 为 0.5~1, 点接触时 m 在 0.5 以下。触头由于电弧的灼烧, 表面出现毛刺、尖端等不规则的接触点, 随着分断次数的增加, 触头由最初近似面与面之间的接触逐渐转化为线接触, 甚至点接触, m 值随之减小。在达到一定的极限后 m 值不再减小, 因此接触电阻不再改变。

2 耐受电压试验

2.1 VCB 承受电压

CRH₂ 型动车组大概每小时会经过 10 个过分相段, 每一次过分相 VCB 会进行一次开合, 差不多 6 min 的时间 VCB 就会开合一次, 频繁的开合要求 VCB 有可靠的寿命。CRH₂ 采用自动过分相段技术, 在过分相前 VCB 分断, 使车载牵引变压器、牵引电机等车载设备和受电弓、电压互感器、高压母线和接触线脱离, 停止对其供电, 过分相后 VCB 闭合, 车载设备又重新通过受电弓从接触线受流供电。

随着主电路中 VCB 反复开断、闭合, 电弧烧蚀产生的气体、杂质会使灭弧室真空度逐渐降低, 如果在列车行驶过程中出现过电压、过电流而导致 VCB 动作保护的情况, 更会加速触头磨损和灭弧室真空度的降低, 其直接后果就是导致开关间隙的耐压能力下降^[11]。同

时由于电弧对电极的烧蚀,使得电极两端产生毛刺尖端,进一步降低了开关的耐压能力。当开关两端承受的耐压值小于瞬态恢复电压或额定工作电压时,即可判断开关寿命终结。

2.2 瞬态恢复电压仿真

根据典型变电站牵引变压器参数以及供电臂长度计算,考虑典型变电站牵引变压器参数,得 $L_s=10.8\text{ mH}$, $R_s=0.165\ \Omega$;在计算供电臂损耗参数时,供电臂长度按25 km计算, $L_l=35.7\text{ mH}$, $R_l=4.45\ \Omega$,母线杂散对地电容 $C_l=0.1342\ \mu\text{F}$;车载变压器的参数有 $R_m=594\ \Omega$, $L_m=291\text{ mH}$, $C_x=0.013\ \mu\text{F}$;根据负载牵引电机的参数有等效电阻 $R_L=23.8\ \Omega$,等效电感 $L_L=38.8\text{ mH}$ 。建立列车过分相段时VCB分断的等效模型如图3所示。利用MATLAB进行仿真分析,将VCB等效为一个开关 K ,设定 K 参数为断路器初始接触电阻加附件电抗值, $R_k=224\ \mu\Omega$, $C_k=0.052\ \mu\text{F}$,在即将进入分相段前,VCB断开,车载牵引变压器中的电流不能突变,它与车顶设备对地电容、中性段对地电容形成暂态振荡,断路器两端会形成很高的振荡电压,如图4所示。

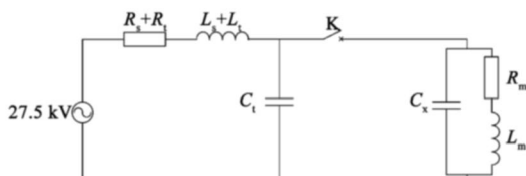


图3 列车过分相时 VCB 分断模型

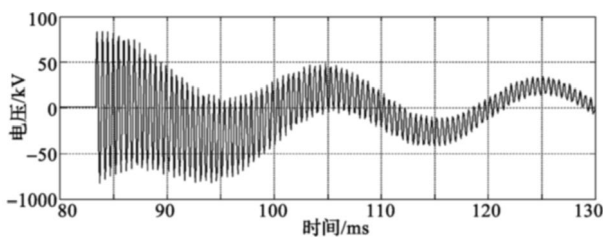


图4 分断瞬间电压波形

变压器励磁电感中的电流在牵引网中的分布电容、车顶高压设备与车体间的分布电容以及线路中的引线电感形成了振荡。设置VCB在83 ms处分断,从仿真结果可以看出,在VCB断开瞬间,断路器两端的电压峰值迅速上升到80 kV左右,是供电电压的3.2倍左右,振荡时间大约在30 ms之后VCB两端电压恢复到25 kV。

将VCB分断5 000次作为一组试验,每分断5 000次后在分断状态下将VCB一端接高压,另一端和箱体外壳均接地,加载冲击电压,幅值80 kV,脉冲宽度50~100 μs ,上升前沿10 μs ,如果没有发生击穿,则判定断路器耐压能力满足要求,进行下一组试验。

VCB分断12万次后,在VCB处于分断状态下施加80 kV冲击电压检测到有电流通过,由此可判定冲击电压击穿了灭弧室内不纯真空,此时动静触头接触电阻为758 $\mu\Omega$,在此之后的每一组试验,VCB灭弧室内不纯真空均可被冲击电压击穿。

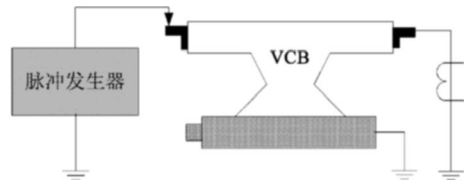


图5 冲击耐受电压试验

2.3 瞬态恢复电压电场分布仿真

如图6、图7所示是VCB灭弧室在80 kV瞬态恢复电压下的电场分布情况,动静触头设定开距为15 mm。图6是VCB分断次数不多情况下,灭弧室真空度很高,设定电导率为理想的0,相对介电常数为1,动静触头表面光滑。如图8(a)所示曲线为两触头间隙中点,在触头正面区域电场大约为5.2 kV/mm,边缘处电场强度迅速下降。而VCB在使用初期灭弧室气体有很高的介电强度,可近似等于真空,常温下真空击穿场强为130 kV/mm,但触头分断会产生炙热电弧,在高温下真空绝缘能力会明显降低^[12],当真空击穿场强比触头间最大电场强度高时,VCB在分断以后能很快地切断电流,使列车供电设备同受电弓、接触网安全分离。图7为VCB经过长时工作后的情况,灭弧室真空度降低,触头表面变粗糙,触头中点间最高电场强度接近6.0 kV/mm,如图8(b),并在触头沿面的尖端处形成8~9 kV/mm的强电场,在动静触头分离时因为触头材料转移和灭弧室介电强度的进一步减弱,有可能导致电弧重燃等现象的发生,影响VCB的正常分断。

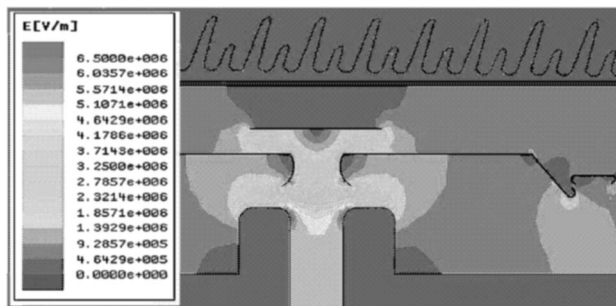


图6 灭弧室初始电场

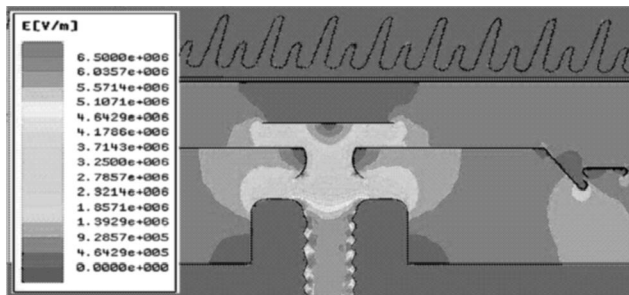
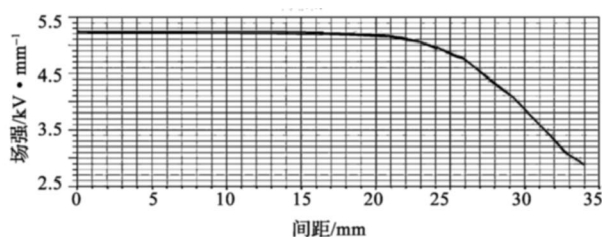


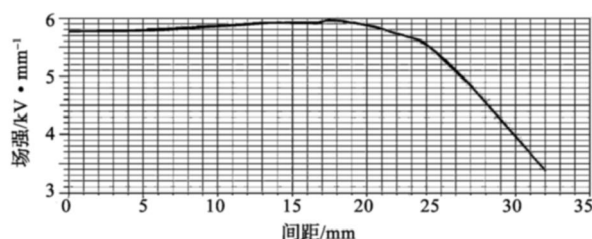
图7 长时工作后灭弧室电场

在VCB分断时,通常从受电弓流入的电流不会立即被切断,动静触头两端会产生电弧,电弧将在灭弧室中被熄灭以实现电流的切断,电流能否被迅速熄灭直接关系到列车运行安全。通常而言,在电流过零时刻电弧能量很小,在断开电弧的瞬间,加载到VCB动静触头的两端的瞬态恢复电压不会超过介质恢复强度,电弧不会重燃。但是由于车载感性设备、接触网、牵引

供电设备的影响, 以及VCB灭弧室真空度的下降和触头磨损, 电弧可能多次重燃, 导致严重的多次重燃过电压现象产生, 高频振荡电压最高值将超过触头间隙的介电强度, 严重危害牵引电机和变压器的匝间绝缘。



(a) 初始情况



(b) 断开12万次后情况

图8 触头间隙中点处场强

2.4 工频耐受电压试验

按照图9连接设备进行实物试验。VCB每分断5 000次测量接触电阻之后, 一端接至400 V/50 kV单向调压变压器二次侧, 另一端和箱体外壳均接地, 逐渐加载电压至工频额定工作电压, 升压时间大于1 min, 直至工作电压的1.3倍即40 kV, 稳定1 min, 如果没有发生击穿, 则判定断路器耐压能力满足要求, 继续下一组试验。

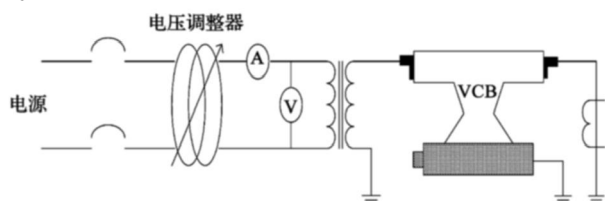


图9 工频耐受电压测试试验

在进行完32组试验, 分断16万次后, 接触电阻值已经不再持续上升, 40 kV工频电压一直仍未击穿灭弧室, 证明VCB即使在经过长期工作后, 正常供电电压还是不能击穿动静触头之间的间隙。

本文未进行开断短路电流和故障电流的试验, 如果开断短路电流和故障电流其使用寿命将会大大缩短。由于VCB切断短路故障电流时触头将承受更剧烈的烧蚀, 同时在开断短路电流和故障电流时也会在触头两端形成幅值、频率更高的振荡电压, 因此触头间隙更容易被击穿。

3 结论

通过理论分析及试验研究得出以下几点结论:

①在CRH₂型动车组车载VCB使用初期, 接触电阻随开断次数的增加而增加, 如果每次分断都是过分相前切断正常电流, 未经过分断前接触电阻为224 $\mu\Omega$, 经过大约12.5万次分断后接触电阻不再上升, 保持在783 $\mu\Omega$ 左右。

②如果通过VCB接触电阻值表征其电寿命, 经过12万次左右分断后接触电阻为758 $\mu\Omega$, 触头电磨损严重、灭弧室真空度降低致使触头在分断瞬间两端电压是供电电压的3倍以上, 瞬态恢复电压超过介质恢复强度造成电弧重燃。

③车载VCB在电寿命终止后无法安全运行的原因是瞬态恢复电压导致电弧重燃, 但是寿命终止后VCB在保持分闸时触头间隙仍不会被工频工作电压击穿。

参考文献:

- [1] 张曙光. CRH₂型动车组 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [2] 文建伟. 高压断路器综合监控系统的断路器电寿命功能模块研究 [J]. 电力科学与工程, 2009, 25(5): 76-78.
- [3] 王章后, 刘全志, 贾俊国, 等. 断路器电寿命预测中的实用电流采样算法及误差分析 [J]. 高压电器, 2000(2): 22-25.
- [4] 孙福杰, 王章后, 秦红三, 等. 高压断路器触头电寿命诊断技术 [J]. 电网技术, 1999, 23(3): 59-61.
- [5] 陈化钢, 潘金奈, 吴跃华. 高低压开关电气故障诊断与处理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [6] 杜凌艳, 王振浩, 王刚, 等. 高压断路器运行状态实时监测系统 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 58-60.
- [7] Slade P G, Smith R K. Electrical Switching Life of Vacuum Circuit Breaker Interrupters [C] // Electrical contacts-2006, proceeding of the fifty-second IEEE Holm conference, 2006: 32-37.
- [8] Schlaug M, Dalmazio L, Ernst U. Electrical Life of Vacuum Interrupters [C] // Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2006: 177-180.
- [9] T Fugel, D Koenig. Switching Performance of Two 24 kV Vacuum Interrupters in Series [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Insulation, 2002, 9(2): 164-168.
- [10] 霍福特, 施耐德. 电接触 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [11] Pons A. Electrical Endurance and Reliability of Circuit-breaker: Common Experience and Practice of Two Utilities [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(1): 168-172.
- [12] Toshiyuki U, Susumu N, Steven B. Effects of Hot SF₆ on Post-Arc Circuit Breaker Design [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 124-130.
- [13] 汤志强, 石晓康. CRH₂型动车组主断路器的选型探讨 [J]. 机车电传动, 2011(5): 69-70.