

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.02.009

断路器开断短路电流累积烧蚀效应研究

张长虹, 杨旭, 黎卫国, 陈伟民, 陈蔚, 黄大为
(南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663)

摘要: 断路器在多次开断短路电流后,准确评估电流能量对灭弧室弧触头的烧蚀程度是一个困扰运维人员的技术难题,特别是在不解体断路器灭弧室的条件下,采用电气试验手段以何种特征参量准确反映弧触头的寿命状态是该难题的关键。文中重点研究断路器开断短路电流后触头的累积烧蚀效应,采用4台真型500 kV柱式断路器作为研究对象,结合动态电阻测试手段,在短路开断合成回路中跟踪检测断路器电寿命试验过程中弧触头状态的演化趋势,研究得到了电寿命试验前后弧触头烧蚀特性,以及表征弧触头状态的特征参量(有效接触位移、接触电阻和累积电流开断能量)的关联性,揭示了短路电流累积开断效应对断路器寿命状态的影响规律,可为运维人员评估断路器灭弧室状态以及制定后续检修策略提供依据。

关键词: 500 kV 断路器; 短路电流; 触头; 累积烧蚀效应; 动态电阻

Study on Cumulative Ablation Effect of Circuit Breaker due to Breaking Short-circuit Current

ZHANG Changhong, YANG Xu, LI Weiguo, CHEN Weimin, CHEN Wei, HUANG Dawei
(Maintenance & Test Center of EHV Power Transmission Company China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

Abstract: To accurately evaluate the ablation degree of contacts of a circuit breaker after repeatedly breaking short-circuit current, four full-size 500 kV circuit breakers were investigated via electrical endurance tests with respect to the cumulative ablation effects of the contacts after interrupting short-circuit current, where dynamic contact resistance measurement (DRM) was adopted. The relationships of effective contact displacement, effective contact resistance, and cumulative current interrupting energy were established according to the variation of the contact ablation conditions in the electrical endurance tests. This study reveals the cumulative ablation effect of circuit breaker on its lifetime state, and may facilitate the condition evaluation of the circuit breaker chamber and the design of the maintenance strategy.

Key words: 500 kV circuit breaker; short-circuit current; contact; cumulative ablation effect; dynamic resistance

0 引言

断路器电寿命是影响其使用年限以及运行稳定性的关键因素^[1-4],决定灭弧室寿命的影响因素有3个:弧触头、喷口与SF₆气体状态。随着中国西电东送等跨区域联网工程陆续投运,高压输电网络送电负荷日益增加,在主网架日益复杂的情况下,一旦线路出现短路故障,短路故障电流对断路器开断性能的考验将更加严苛,主要反映在对弧触头的累

积烧蚀效应。

因此,对于多次开断线路故障电流的断路器,亟需提出一种有效的方法,在不解体灭弧室的情况下检测并评估弧触头的烧蚀状态。目前,动态电阻测试法是一种较有效的试验手段,该方法利用弧触头在开合过程中先于主触头接触后于主触头分离的特点,在断路器动作时几ms至十几ms的时间内,得到弧触头的接触电阻变化数值以及接触位移,从而为评估触头电寿命提供依据。

据调研,国内外主流的断路器特性测试仪器厂家已研发出满足上述测试需求的动态电阻测试仪,由于该项技术尚处探索阶段,仪器仍未批量生产,仅少量供货电力科研院用于相关的试验研究,因此尚未有相关的试验标准与技术规范^[5-8],而且各型号仪器试验回路的测试电流从200 A至2 500 A的范围内配置不一,文[9]成果指出:提高测量电流不仅有利于确定弧触头的有效接触位移,还可以减小动态电阻特征量的分散性,当试验电流超过700 A时,特征量分布趋于稳定。

目前动态电阻测试技术的最新研究进展包括:提出弧触头接触电阻的评价指标与方法^[10],以及通过110 kV样机烧蚀试验初步得到断路器触头电寿命的预测方法^[11]。

通过对国内外研究现状的分析可知,尚未完全建立起触头动作过程多特征指标与其电寿命的关联性,如文[10]仅以动态接触电阻平均值作为状态评价指标,而且也未见以500 kV断路器作为试验样机的测试数据,

因此,文中以500 kV断路器作为研究对象,在电寿命试验过程中多次开展动态电阻测试,提取可有效表征触头烧蚀状态的特征参量,分析各参量的关联性,探索断路器电寿命不同阶段触头特征参量的演化规律。

1 试验方案

1.1 试验回路

由于弧触头烧蚀程度主要由开断电弧的参数(开断短路电流能量与长燃弧时间)决定,电弧除了对触头表面进行电烧蚀^[5,12],拉弧过程中,弧根的高温作用还会导致弧触头表面金属软化,在摩擦运动时造成机械磨损,因此,试验方案的思路为采用500 kV断路器作为电寿命试验样机,通过动态电阻法跟踪试验过程弧触头烧蚀状态的变化以及累积开断能量的关联。

在国家高压电器大容量实验室进行短路电流开断试验,采用电流引入法合成回路,回路由电流源与电压源两部分组成。烧蚀试验回路原理图见图1,主要分为短路电流产生回路、短路电流引入回路以及暂态恢复电压开断回路3个部分。短路电流引入回路中的AB(辅助断路器)即为该次的试验样机^[13-17]。

试验前,试验样机AB和被试断路器TB都处于合闸位置。操作开关MB闭合使电流源G提供的短路电流 i_g 流过两台断路器。在 t_0 时刻试验样机和被

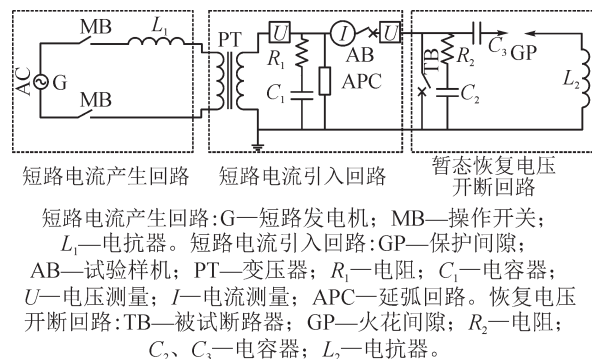


图1 开断短路电流合成试验原理图

Fig. 1 Diagram of the synthetic test of short-circuit breaking

试断路器触头分开,此时灭弧回路APC使试验样机的燃弧时间固定在15 ms,在 t_1 时刻,火花间隙GP点火,试验前已经充完电的电压源主电容器组 C_3 通过电抗器 L_2 放电,引入高频电流 i_v ,并与短路电流 i_g 叠加。由于电流源的激励电压相当低,对于TB试验样机而言仅需承受触头刚分后工频短路电流电弧的烧蚀,而被试断路器在 t_2 时刻开断短路电流(i_g+i_v)后,断口还需承受有电压回路提供的受参数 C_2 、 R_2 、 C_3 和 L_2 控制的暂态恢复电压的作用。因此,两台断路器分别经历以下两个阶段:

1) $t_0 \sim t_1$ 时刻,试验样机AB开断短路电流 i_g ,燃弧时间15 ms。

2) $t_1 \sim t_2$ 时刻,被试断路器TB开断短路电流(i_g+i_v)。

该试验方案中,试验样机开断短路电流幅值主要分布在20~63 kA范围内,燃弧时间保持15 ms不变。

1.2 试品参数

试验样机采用500kVLW15-550型瓷柱式断路器(配置CYA6液压弹簧操动机构),通流主触头载流接触部位为铜镀银,弧触头引弧部位材料为铜钨合金,采用钨骨架真空溶渗法工艺^[18]。试验样机断口示意图见图2,具体参数见表1、2(弧触头化学成分为Cu占(30±2.0)%;W占(70±2.0)%;杂质≤0.5%)。

1.3 试验仪器技术要求

动态电阻测试原理是:在断路器分闸状态下将试验接线连接完毕,对断路器进行合一分操作,在金短时间内储满电能的超级电容器在断路器断口形成放电回路,在分闸过程中放电电流路径分别经历主触头和弧触头两个接触阶段,在这两个阶段中的触头接触电阻是不一样的,通过测量回路电流以及断口压降,配合对断路器分闸速度的监测,可以计算出弧触头的接触电阻及接触位移^[19]。

采用国内某型号动态电阻测试仪器,试验测量接线见图3,测量电源采用16 V maxwell超级电容

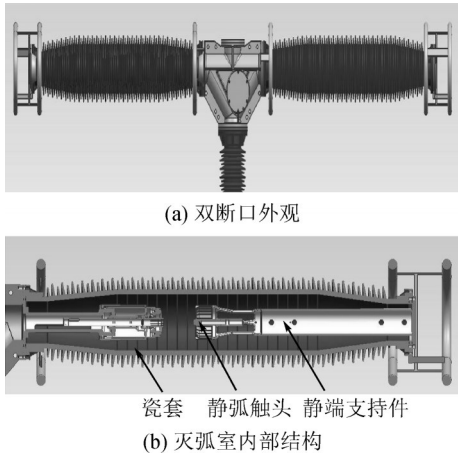


图2 试验样机断口示意图

Fig. 2 Schematic diagram of arc chamber of the test prototype

表1 灭弧室内部结构参数表

Table 1 Internal structure parameter table of arc chamber				mm
弧触头 开距	触头运 动行程	弧触头接 触位移	主触头接 触位移	
195.0	230.0 ⁺² ₋₅	27.0±2.0	13.6	

表2 弧触头具体参数表

Table 2 Parameter table of arc contact					
材料	密度/ (g·cm ⁻³)	电阻率(20℃) 不大于/ (μΩ·cm)	导电 度/AICS%	硬度不小 于/HBS	抗弯强 度不小 于/MPa

器,最大输出电流3 000 A,内阻≤1 mΩ;电压采集模块A/D转换位数为16位,采用霍尔电流传感器进行电流采集,信号采样频率20 kHz。

1.4 关键特征参量定义

为方便研究,对弧触头状态的4个关键特征参量进行以下定义:

1)弧触头有效接触状态。在断路器的分合闸过程中,当弧触头接触电阻小于或等于某一阈值(该值可参照动态接触电阻的测量值给出)时认为弧触头属于有效接触状态,当接触电阻大于该值时认为弧触头属于无效接触,为分离状态(并非绝对分离,而是为了方便数据分析)。由于动态电阻测试时试验电流达到2 000 A以上,在弧触头金属绝对分离时,会出现短暂拉弧现象,通过测试手段以接触电阻无穷大时作为触头绝对分离时刻是不准确的,因此文中定义某阈值作为弧触头接触边缘值,仅为了方便试验数据趋势分析。

2)有效接触位移。在断路器的分合闸过程中,主触头刚分离后,弧触头接触电阻小于或等于阈值

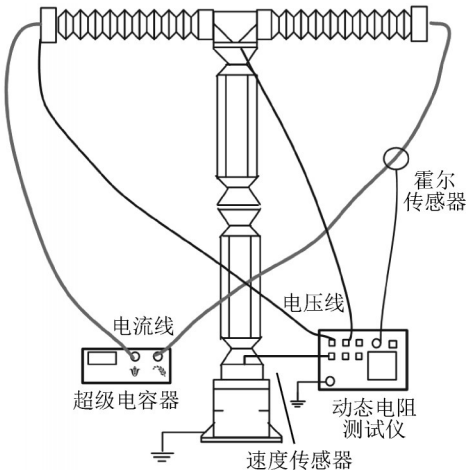


图3 动态电阻接线示意图

Fig. 3 Wiring diagram of DRM

(2 000 μΩ)时所对应的接触位移,称为有效接触位移。该次试验样机主触头与弧触头同时接触的行程为14 mm。

3)累积接触电阻。有效接触位移所对应采样时刻接触电阻的累积值。试验仪器采样率为20 k,即每0.05 ms得到对应的接触电阻值,对有效接触位移曲线范围内的接触电阻进行积分,可得累积接触电阻μΩ·mm。

4)平均接触电阻。累积接触电阻除以有效接触位移,可得平均接触电阻μΩ/mm,可较好地体现触头烧蚀后接触电阻以及有效接触位移的变化情况。

2 真型样机试验分析

2.1 短路开断试验前后弧触头状态

该次短路开断试验共采用4台500 kV试验样机,试验样机的开断燃弧时间设定为固定值15 ms,记录每两次动态电阻测量之间的试验电流累积值。

以1号样机为例,该样机在电寿命试验过程中前后4次的静态电阻测量的电阻值见表3,测量电流为DC 300 A。

表3 合闸状态下静态电阻值

Table 3 Static resistance value under closing state					
测试次序	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次
阻值/μΩ	41.5	42.3	40.8	41.0	40.4

由于静态电阻是在合闸状态下测量,断路器合闸状态下主要通过主触头载流,不具备开断电流时的引弧、拉弧功能,一般不存在磨损及烧蚀情况,因此在试验后接触状态良好,接触电阻值没有明显变化^[20]。

采用精度为1 g的电子天秤测量4台样机共8个断口的弧触头在试验前以及试验后的重量变化,测量数据见表4,试验前后触头重量对比见图4。4台

样机具体的开断次数以及累积开断电流见表5。

表4 试验样机单位库仑质量损失

Table 4 Unit Coulomb mass loss of test prototype

样机	触头质量 损失/g	总开断电 流/kA	库仑 量/C	单位库仑质 量损失/ ($F \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)
1号	121	1 177.5	17 655	6.853 583
2号	144	1 446.0	21 690	6.639 004
3号	192	1 167.6	17 505	10.968 290
4号	208	1 327.0	19 905	10.449 640

表5 试验样机技术参数

Table 5 Technical parameters of test prototype

项目	参数						
1号 样机	测试日期	2016-07-11	2016-07-15	2016-07-25	2016-08-02	2016-08-08	合计
	开断电流/kA	0.0	31.5	390.0	441.0	315.0	1 177.5
	累积开断能量 $\sum I^2/\text{kA}^2$	0.00	992.25	17 942.25	45 725.25	65 570.25	130 230.00
	开断电流 kA×开断次数	0.0	31.5×1	40.0×3+45.0×6	63.0×7	63.0×5	—
2号 样机	测试日期	2016-08-12	2016-08-15	2016-08-16	2016-08-17	2016-08-18	合计
	开断电流/kA	288	441	315	250	152	1 446
	累积开断能量 $\sum I^2/\text{kA}^2$	17 172	44 955	64 800	77 300	83 076	287 303
	开断电流 kA×开断次数	63×4+36×1	63×7	63×5	50×5	38×4	—
3号 样机	测试日期	2016-09-29	2016-10-12	2016-10-18	2016-10-25	2016-11-01	合计
	开断电流/kA	0.0	124.8	571.0	88.4	383.4	1 167.6
	累积开断能量 $\sum I^2/\text{kA}^2$	0.00	49.92	30 933.60	31 573.90	48 734.32	111 291.74
	开断电流 kA×开断次数	0.0	0.4×312	50.0×6+63.0×4+0.4×48	0.4×96+12.5×4	0.4×96+15.0×4+57.0×5	—
4号 样机	测试日期	2016-11-23	2016-12-02	2016-12-05	2016-12-08	—	合计
	开断电流/kA	0	378	285	664	—	1 327
	累积开断能量 $\sum I^2/\text{kA}^2$	0.00	11 907.00	20 837.25	41 674.50	—	74 418.75
	开断电流/kA×开断次数	0.0	31.5×12	31.5×9	31.5×21	—	—

弧触头轴向、径向尺寸及基材重量与电寿命试验前后对比见表6、7。

触头质量测量数据表明:电寿命试验结束后,弧触头基材总质量会出现120~200 g左右的损失,但由于触头材料的侵蚀还需电弧能量、触头热应力的综合作用,当电弧在触头上停留的位置以及持续时间不稳定时,则无法构建触头磨损量与电寿命的关系式。

从1~4号样机弧触头试验前后状态对比可知,弧触头的烧蚀、磨损存在一定分散性,基材重量损失程度与累积开断电流无明显相关性,从表6、7可知,2号样本的累积开断电流最大(1 446 kA),相比

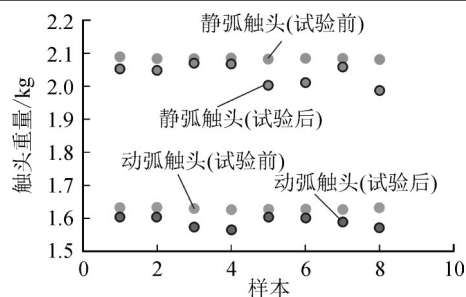


图4 试验前后弧触头重量变化对比

Fig. 4 Comparison of the change of the arc contact weight before-after test

1号样本,触头重量变化不明显。反之,3号样本和1号样本的累积开断电流基本相当(分别为1 167.6、1 177.5 kA),但两者触头重量的变化反而超过了2号样本和1号样本的触头重量的变化。试验前后动静弧触头烧蚀状态对比见图5。

触头尺寸测量数据表明:径向尺寸方面,动静弧触头在0.45 mm以内的变化范围,由于表面烧蚀生成物附着的影响,静弧触头头部厚度略有增加,动弧触头内径略有减小;轴向尺寸方面,静弧触头比动弧触头的长度缩短2~3倍左右。

由于断路器开断电流幅值高(50~63 kA),虽然总操作次数少于小电流开断,但是大能量电弧会使触头边缘熔化或汽化的材料大幅增加,熄弧后迅速

表6 试验前后弧触头尺寸变化

Table 6 Arc contact size change before-after test mm							
项目	静弧触头			动弧触头			
	试验前	试验后	变化值	试验前	试验后	变化值	
1号样机	长A	170.11	168.77	-1.34	104.01	103.52	-0.49
	度B	170.15	167.94	-2.21	104.03	103.29	-0.74
	直A	35.03	35.29	0.26	33.05	32.80	-0.25
	径B	35.01	35.20	0.19	32.98	32.54	-0.44
2号样机	长A	170.16	166.55	-3.61	104.03	102.93	-1.10
	度B	170.11	167.75	-2.36	104.01	102.76	-1.25
	直A	35.02	35.22	0.20	33.03	32.65	-0.38
	径B	35.03	35.10	0.07	33.02	32.61	-0.41
3号样机	长A	170.14	169.10	-1.04	104.05	103.27	-0.78
	度B	170.11	168.14	-1.97	104.01	102.68	-1.33
	直A	35.01	34.97	-0.04	33.03	32.52	-0.51
	径B	35.03	34.93	-0.10	33.05	33.12	0.07
4号样机	长A	170.13	168.14	-1.94	104.03	103.00	-1.03
	度B	170.08	166.94	-3.19	104.08	102.68	-1.40
	直A	35.05	35.10	0.05	33.05	33.03	-0.02
	径B	35.03	34.93	-0.10	33.02	32.43	-0.59

注:A为A断口灭弧室;B为B断口灭弧室。

表7 试验前后弧触头重量变化

Table 7 Arc contact weight change before-after test		
样机	动静弧触头质量损失/g	总开断电流/kA
1号	121	1 177
2号	144	1 446
3号	192	1 167
4号	208	1 327



图5 试验前后动静弧触头烧蚀状态对比

Fig. 5 Comparison of ablation state of arc contacts before-after test

以不规则形状凝固并附着在触头表面,因此在试验完成后,触头径向位移量增加了0.48~0.63 mm。虽然径向位移量略微增加可使接触面机械压力变大,但表面粗糙度同时也增加了,凸丘高度标准偏差增大对弧触头接触电阻的影响程度超过了位移量,触

头表面实际接触面的面积率减小,电流密度增加,高电流密度将导致触头局部迅速升温并进一步促使材料发生熔化和汽化,呈现出来的湍流特征将加剧电弧燃烧和触头材料的磨损,因此弧触头接触电阻会随着开断短路电流能量的累积而出现增大的趋势,呈正相关性^[20-23]。

2.2 动态电阻测试数据处理

以第3台试验样机开断试验为例,在试验过程中,按照表8所示累积开断电流间隔次序,关注断路器某一断口的触头接触位移与电阻的演化趋势,见图6,随着试验开断电流能量的累积,弧触头有效接触位移缩短,接触电阻在一定的阈值范围内波动的幅度更大,单位行程内平均接触电阻值更高,特别在第5次测量时,弧触头起始有效接触电阻明显高于之前的测量值,可达到450 μΩ以上,该测量结果与文[10-11]的分析结论是一致的。

表8 累积开断电流间隔次序表

Table 8 Interval order table of cumulative breaking-current	
测试次序	累积开断电流/kA×开断次数
第1次	0.0
第2次	0.4×312
第3次	50.0×6+63.0×4+0.4×48
第4次	0.4×96+12.5×4
第5次	0.4×96+15.0×4+57.0×5

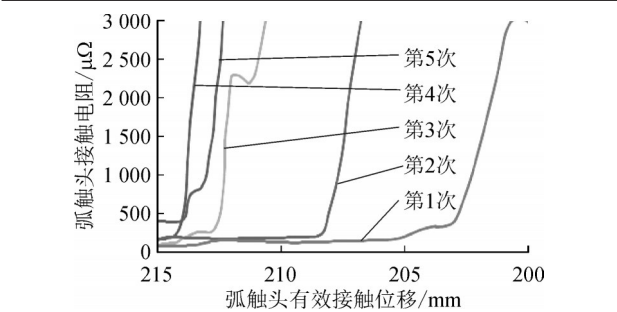


图6 弧触头有效接触位移变化趋势

Fig. 6 The trend of effective contact strip of arc contacts

从动态电阻实测数据发现,当接触电阻值超过2 000 μΩ时,随时间的变化陡度急剧增大,每0.05 ms的阻值增幅超过5 00 μΩ,并很快趋向无穷大,为了统一研究标准,设定2 000 μΩ作为弧触头有效接触判定值(阈值),从而可得到其他关键特征值:有效接触位移(弧触头单独接触的行程D)、累积接触电阻(在有效接触位移下接触电阻的积分 $\int R_{(D)}dD$)及平均接触电阻($\frac{\int R_{(D)}dD}{D}$),以第3台试验样机为例,两个断口的有效接触位移与平均接触电阻见图7。

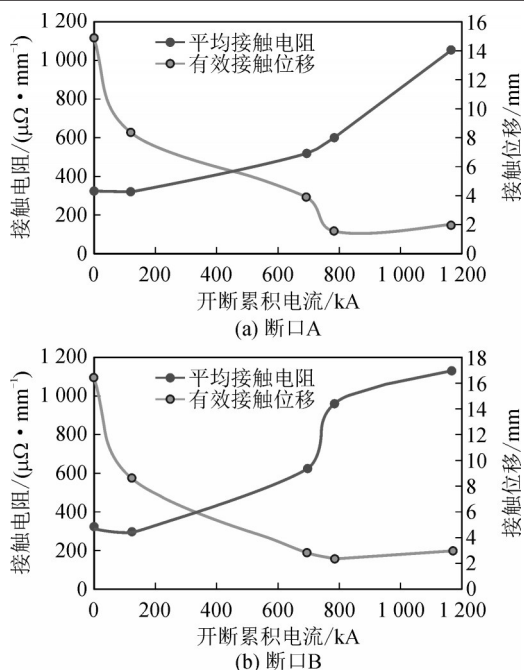


图7 接触位移—接触电阻—累积电流关系

Fig. 7 Relationship ineffective contact strip-contact resistance-cumulative current

4台样机的测试数据表明,虽然特征值初始状态不一致,但有相同的变化趋势,随着开断电流的累积烧蚀效应,弧触头有效接触位移呈指数单调递减,而平均接触电阻呈指数单调递增。

2.3 数据分析与拟合

该小节对样机关键特征参量:累积开断能量、有效接触位移及平均接触电阻进行拟合,归纳电流累积效应与弧触头状态的关联性。

对累积开断能量 $Q(\Sigma I^2 \times 10^4 \text{ kA}^2)$ 下的弧触头有效接触位移进行指数拟合(图8),有效接触位移随累积开断能量的增加而呈指数减小,见式(1)

$$L = 8.8e^{-\frac{Q}{3.5}} \quad (1)$$

对累积开断能量 $Q(\Sigma I^2 \times 10^4 \text{ kA}^2)$ 下的弧触头平均接触电阻进行指数拟合(图9),弧触头平均接触电阻随累积开断能量的增大而呈指数增加,见式(2)

$$\bar{R} = \frac{e}{3} e^{\frac{Q}{4.5}} \quad (2)$$

对弧触头有效接触位移对应的平均接触电阻进行幂函数拟合(图10),有效接触位移 L 在 0~5 mm 的区域时,平均接触电阻随有效接触位移的增加而呈快速下降趋势,接触位移大于 5 mm 以后,平均接触电阻变化渐趋于平稳,见式(3)

$$\bar{R} = 1.4 \times L^{-0.6} \quad (3)$$

基于4台样机的触头质量损失与开断短路电流幅值的关联,计算触头质量侵蚀量,基于燃弧时间和电流峰值,计算每次开断试验的库仑量。由于每

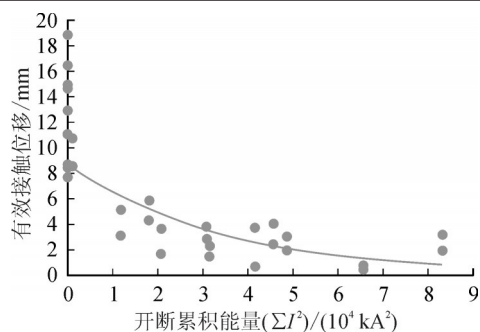


图8 开断累积能量—有效接触位移关系

Fig. 8 Relationship between breaking cumulative energy-effective contact strip

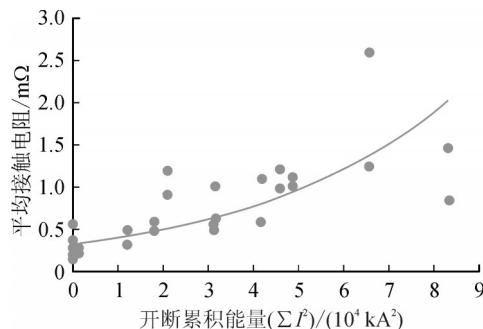


图9 开断累积能量—平均接触电阻关系

Fig. 9 Relationship between breaking cumulative energy-average contact resistance

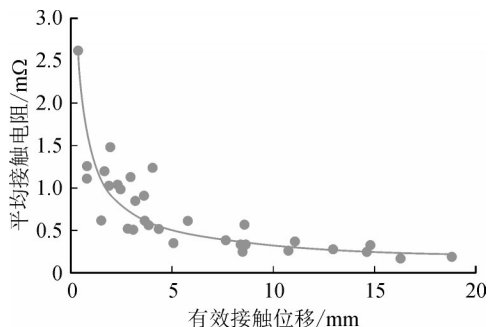


图10 有效接触位移—平均接触电阻关系

Fig. 10 Relationship between effective contact strip-average contact resistance

次开断的燃弧时间固定为 15 ms,即使实际电流为衰减波形,可近似按式(4)进行计算

$$C = \int_0^t I_m \sin(2\pi f t) dt \quad (4)$$

式(4)中: C 为库仑量; t 为燃弧时间; I_m 为电流峰值; f 为频率。

单位库仑量的平均质量损失 F 按照式(5)进行计算

$$F = \Delta m / \sum_{i=1}^{100} C \quad (5)$$

得到数据见表4。

文[14]得到 CuW80 弧触头在电流 20 kA 燃弧时间 9 ms 下的质量损失率约为 0.6 mg/C,而文中 CuW70 触头在电流 30~63 kA 不等,燃弧时间 15 ms 下的质量损失率约为 8.72 mg/C。

以2号样机电寿命测试数据为例,代入式(4)、(5),得到表9数据。

表9 2号样机弧触头质量损耗

Table 9 Mass loss of arc contact of No.2 prototype

开断次数	开断电流/kA	每次开断库伦量	开断侵蚀率	每次开断弧触头质量损耗/g
1	63	945	0.003 32	3.1
2	63	945	0.003 32	3.1
3	63	945	0.003 32	3.1
4	63	945	0.003 32	3.1
5	36	540	0.003 32	1.8
6	63	945	0.003 32	3.1
7	63	945	0.003 32	3.1
8	63	945	0.003 32	3.1
9	63	945	0.003 32	3.1
10	63	945	0.003 32	3.1
11	63	945	0.003 32	3.1
12	63	945	0.003 32	3.1
13	63	945	0.003 32	3.1
14	63	945	0.003 32	3.1
15	63	945	0.003 32	3.1
16	63	945	0.003 32	3.1
17	63	945	0.003 32	3.1
18	50	750	0.003 32	2.5
19	50	750	0.003 32	2.5
20	50	750	0.003 32	2.5
21	50	750	0.003 32	2.5
22	50	750	0.003 32	2.5
23	38	570	0.003 32	1.9
24	38	570	0.003 32	1.9
25	38	570	0.003 32	1.9
26	38	570	0.003 32	1.9

表9试验数据表明:随着开断电流、燃弧时间递增,质量损失率 F 呈正相关性,结合4台样机实测数据,通过拟合可得到开断电流幅值与弧触头烧损量的关系式

$$I_s = 1.026 6e^{0.020 4\Delta m} \quad (6)$$

3 新旧断路器现场动态电阻实测

该小节针对不同于实验室样机型号的断路器,开展动态电阻现场实测,对比分析开关设备在不同运行年限下的触头有效接触电阻与有效接触位移的变化情况。

现场测试对象为换流站交流滤波器用断路器(型号:HPL550-B2),采用自能压气式灭弧原理,动触头总动作行程208.7 mm,主触头刚分点170 mm,合分时间35~42 ms。该型号设备在±500 kV 肇庆站

运行了12年,在±800 kV 东方站为尚未投运的全新产品。

交流滤波器用断路器与文中实验研究的线路断路器在运行工况、触头烧蚀模式均有较大不同,主要有以下2点:

1)滤波器用断路器需要频繁开合操作,平均一年开合操作次数达到200次左右,线路断路器平均一年的操作次数在10~20次左右,滤波器用断路器的触头机械磨损程度甚于线路断路器。

2)线路断路器开断故障短路电流幅值可达几十kA,短路电弧对弧触头的烧蚀程度巨大,而滤波器用断路器开断容性电流幅值在300~400 A左右,关合电流幅值按照不同的负载容量以及每次关合角度的差异而分布在几kA~十几kA范围内。

综上,虽然线路断路器与滤波器用断路器的弧触头侵蚀机理与模式均存在较大区别,但是由于弧触头烧蚀或磨损的特性是一样的,因此仍可将有效接触电阻与有效接触位移作为表征弧触头烧蚀状态的特征参量。

文中以两个站各一组的断路器进行实测对比,共三相6个断口,每个断口测量5次取平均值,对6组试验数据进行累积接触电阻积分、有效接触位移以及平均接触电阻的计算处理,散点分布情况见图11。

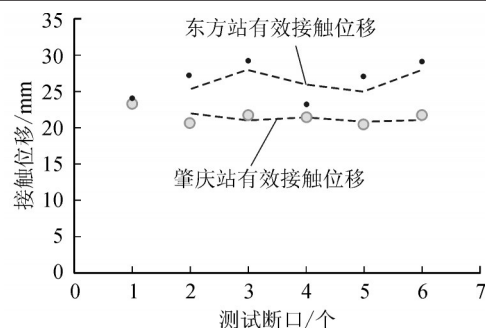
图11表明,肇庆站运行了12年的断路器弧触头有效接触位移比东方站平均缩短了19%,平均接触电阻比东方站断路器平均增加了205%。

根据文中试验拟合式(1),弧触头有效接触位移与累积开断能量的指数关系 $L = 8.8e^{\frac{-Q}{3.5}}$,当有效接触位移达到初始值的81%时,此时的累积开断能量为电寿命许用能量12%,符合肇庆站断路器的实际运行状态。该设备在12年运行时间里,总开合操作次数1 900次,开断电流300~400 A,关合电流1~2 kA,解体灭弧室检查发现,弧触头无发现异常烧蚀情况。

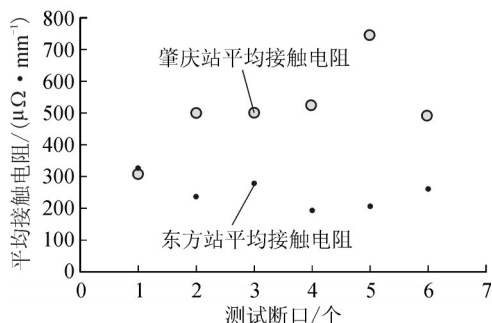
由于HPL550-B2型与LW15A-550型断路器在灭弧室触头结构设计以及触头动作行程等方面有较大差别,有效接触位移与接触电阻的关联经验公式的适用性仍需进一步完善。

4 结论

1)定义弧触头状态特征参量:累积开断电流能量、有效接触位移以及有效接触电阻,将有效接触电阻阈值设置为2 000 μΩ,基于500 kV 断路器的电寿命试验,跟踪弧触头动态接触电阻的演化趋势。



(a) 东方站、肇庆站有效接触位移散点分布图



(b) 东方站、肇庆站平均接触电阻散点分布图

图 11 散点分布图

Fig. 11 Diagram of scattered distribution

2)多台试验样机数据表明,断路器弧触头特征参量在电寿命试验过程中有相同的演化趋势,随着开断电流的累积,弧触头有效接触位移呈负相关,平均接触电阻呈指数增加趋势。

3)当弧触头有效接触位移大于5 mm时,平均接触电阻变化趋于平稳,有效接触位移在0~5 mm的区域时,平均接触电阻随着有效接触位移的增加而呈快速下降趋势;当弧触头起始有效接触电阻达到450 $\mu\Omega$ 以上时,断路器已接近电寿命末期,应引起运维部门重视。

参考文献:

- [1] HEISING C R, JANSSEN A L J, LANZ W, et al. Summary of CIGRE 13.06 working group worldwide reliability data and maintenance cost data on high voltage circuit breakers above 63 kV[C]//Proceedings of the 29th IAS Annual Meeting. Denver, USA: IEEE, 1994: 2226-2234.
- [2] SUN F J, QIN H S, WANG Z Q. Diagnosis techniques on contact electrical endurance of high voltage circuit breakers [C]//Proceedings of 1998 International Conference on Power System Technology. Beijing, China: IEEE, 1998: 105-109.
- [3] 郭贤珊, 王章启. 高压断路器触头电寿命预测的研究[J]. 高电压技术, 1999, 25(3): 43-44.
GUO Xianshan, WANG Zhangqi. Research on expectancy of electrical endurance of HV circuit breaker contact[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(3): 43-44.
- [4] 宋 杲, 顾霓鸿. 高压开关设备运行及故障分析[J]. 供用

电, 2007(1): 6-9.

SONG Gao, GU Nihong. Analysis of operation and fault of HV switchgear[J]. Distribution & Utilization, 2007(1): 6-9.

- [5] LANDRY M, MERCIER A, OUELLET G, et al. A new measurement method of the dynamic contact resistance of HV circuit breakers[C]//IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, PES TD 2005/2006. Dallas, USA: IEEE, 2006: 1002-1009.
- [6] LANDRY M, TURCOTTE O, BRIKCI F. A complete strategy for conducting dynamic contact resistance measurements on HV circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 710-716.
- [7] 胡伊兰, 程 红, 张 丰, 等. 高压断路器动态电阻测试仪的设计[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 105-106.
HU Yilan, CHENG Hong, ZHANG Feng, et al. Design of dynamic resistance tester for high voltage circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 105-106.
- [8] 高压开关装置和控制装置. 第100部分: 交流电流断路器: IEC 62271-100: 2008[S]. 2008.
High-voltage switchgear and control gear-part 100: High-voltage alternating-current circuit breakers: IEC 62271-100: 2008[S]. 2008.
- [9] 程亨婷, 高文胜, 陈 锋, 等. 试验电流对高压断路器动态回路电阻的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 3142-3147.
CHENG Tingting, GAO Wensheng, CHEN Feng, et al. Influence of injected current on dynamic contact resistance measurements of high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 3142-3147.
- [10] 傅 中, 陈维江, 李志兵, 等. 大容量电容器组用断路器弧触头侵蚀状态的评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5668-5677.
FU Zhong, CHEN Weijiang, LI Zhibing, et al. Assessment method of arcing contacts erosion condition of circuit breakers used for large capacity capacitor banks[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5668-5677.
- [11] 蓝 磊, 陈 功, 文习山, 等. 基于动态电阻测量的SF₆断路器触头烧蚀特性[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1731-1738.
LAN Lei, CHEN Gong, WEN Xishan, et al. Erosion characteristics of SF₆ circuit breaker contacts based on dynamic contact resistance measurement[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1731-1738.
- [12] 丁 璨, 原浠超, 李志兵, 等. SF₆断路器弧触头的关合侵蚀特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3228-3234.
DING Can, YUAN Xichao, LI Zhibing, et al. Contact erosion characteristics in making process of SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3228-3234.
- [13] 杨一鸣, 曹燕明. 用合成回路进行±800 kV向家坝—上海工程换流阀运行试验[J]. 高电压技术, 2010, 36(1):

- 281-284.
- YANG Yiming, CAO Yanming. Operational test of Xiangjia-ba-Shanghai ± 800 kV UHVDC thyristorvalve on the synthetic test circuit[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1):281-284.
- [14] 武建文, 王贺飞, 蒋 原, 等. 高压断路器分—合能力合成回路试验模拟系统设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3150-3155.
- WU Jianwen, WANG Hefei, JIANG Yuan, et al. Design of simulation system of the synthesis loop for testing the closing capacity of high voltage breaker[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3150-3155.
- [15] 金立湘. 高压 SF₆ 断路器的电寿命试验[J]. 高压电器, 1999, 35(2): 28-31.
- JIN Lixiang. Electrical life test on high-voltage SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 1999, 35(2): 28-31.
- [16] TEPPER J, SEEGER M, VOTTELER T, et al. Investigation on erosion of Cu/W contacts in high-voltage circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(3): 658-665.
- [17] 徐国政, 张节荣, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 100-101.
- XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Principle and application of high voltage circuit breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 100-101.
- [18] 黎 斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 第4版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- LI Bin. SF₆ high - voltage electrical appliances design[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [19] 高压交流断路器: GB 1984—2014[S]. 2014.
- High - voltage alternating - current circuit - breakers: GB 1984—2014[S]. 2014.
- [20] 卡普塔诺维克. 高压断路器-理论, 设计与试验方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- KAPETANOVIC M. High voltage circuit breakers[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [21] 布朗诺维克, 康奇兹, 米西金, 等. 译. 电接触理论、应用与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- BRAUNOVIC M, KONCHITS V V, MYSHKIN N. Electrical contacts fundamentals, application and technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [22] 柏小平, 李国伟, 翁 桅, 等. 电触头表面状态对接触电阻的影响和改善方法[J]. 电工材料, 2013(1): 10-15.
- BAI Xiaoping, LI Guowei, WENG Wei, et al. Effects of contact surface condition on contact resistance and improving methods[J]. Electrical Engineering Materials, 2013(1): 10-15.
- [23] 胡星福, 高华云, 毛江虹. 触头表面粗糙度对接触电阻影响的探讨[J]. 电工材料, 2004(1): 14-16.
- HU Xingfu, GAO Huayun, MAO Janghong. Discuss in the effects of contact surface coarseness on contact resistance [J]. Electrical Engineering Materials, 2004(1): 14-16.
- 张长虹(1983—), 男, 教授级高级工程师, 高级技师, 主要从事高电压技术试验研究工作。