

真空有载分接开关用平板电极老炼实验研究

刘心悦¹, 李小钊¹, 赵芳帅¹, 郭润韬¹, 谷凤娟¹, 郭靖², 赵梓乔²,
史宗谦², 孙佳佳², 莫永鹏²

(1. 天津平高智能电气有限公司, 天津 300300; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 为研究老炼对电极表面状况及燃弧过程的影响,在可拆卸真空灭弧室中对真空有载分接开关用平板电极进行了老炼实验,使用高速摄像机拍摄了燃弧图像,使用示波器采集了电压电流波形。对比分析了不同老炼程度下的阴极斑点运动状态及电弧电压波形,实验结果表明,随着老炼的进行,在阴极斑点的清洁作用下,电极表面的污染物被逐渐清除,阴极斑点运动更加稳定,电弧电压降低并且波动减小。

关键词: 真空有载分接开关; 真空电弧; 电流老炼; 电弧电压; 阴极斑点

Research on Plate Electrode Aging Experiment for Vacuum On-load Tap-changers

LIU Xinyue¹, LI Xiaozhao¹, ZHAO Fangshuai¹, GUO Runtao¹, GU Fengjuan¹, GUO Jing²,
ZHAO Ziqiao², SHI Zongqian², SUN Jiajia², MO Yongpeng²

(1. Tianjin Ping Gao Intelligent Electric Co., Ltd., Tianjin 300300, China; 2. State Key Lab of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For studying the influence of aging on electrode surface and arcing process, the aging experiments of plane electrode for vacuum on-load tap-changer are carried out in a demountable vacuum interrupter. The arcing image is taken by a high-speed camera, and the voltage and current waveforms are acquired by oscilloscope. The motion condition of cathode spot and arc voltage waveform under different aging are compared and analyzed. Experiment result show that with the conduction of aging, the contaminant on the electrode surface is removed gradually under the cleaning effect of cathode spots. The cathode spots are more stable in movement, the arc voltage is decreased and its fluctuation is reduced.

Key words: vacuum on-load tap-changer; vacuum arc; current aging; arc voltage; cathode spot

0 引言

换流变压器(后文简称“换流变”)作为交流和直流系统的电气隔离组件,是整个直流输电系统中必不可少的重要设备^[1]。换流变均装配有有载分接开关(on-load tap-changer, OLTC)这一组件,其具有补偿交流电压波动,优化换流阀触发角控制,以及实现直流降压运行的功能^[2],是换流变中的重要设备。为满足 OLTC 补偿换流变交流侧电压波动变化、保证运行的稳定性和可靠性而频繁动作的要求^[1-3],早期非真空式 OLTC 中的铜钨电极需要高频次进行切换

操作,这会导致电极烧损、油的碳化和污染问题较为严重。直到20世纪末,随着真空灭弧室介质恢复快、电弧能量小等优越性能越来越突出及真空灭弧室小型化技术的不断发展^[4-5],越来越多的 OLTC 开始采用真空灭弧室作为负载转换开关^[6],其具有体积小、维护量小且不易引起油的碳化^[1-2]等优点。对于应用在 OLTC 中的真空灭弧室,需要开断的是与额定电流同一量级的电流,开断过程中产生的能量并不大,但在换流变调压过程中需要长期频繁的进行操作^[6]。与常规真空断路器的 50 次短路电流的开断寿命相比,几十万次小电流切换的电寿命对

真空灭弧室开断电弧的稳定性和可靠性提出了更高的要求^[3]。综合来看,OLTC对于真空灭弧室的整体要求是能够高频次、稳定可靠的开断额定电流级别的电流,并且要具有极高的电寿命。

在一次负载切换过程中,真空灭弧室能否成功开断,很大程度上取决于当前电极表面状况、灭弧室内部环境以及此次开断时的燃弧情况^[3],而电极表面状况及灭弧室内部环境主要由先前的燃弧过程决定。因此,每次开断时的燃弧过程对于当次开断以及后续开断能否顺利完成有着重要意义。应用在OLTC中的真空灭弧室需要开断的电流较小^[1],开断过程中的真空电弧通常处于扩散态^[7],其燃弧过程主要由阴极斑点决定。而对于开断电流确定、分闸速度确定、结构确定的一对电极,其表面状况的变化会对阴极斑点运动和电弧特性产生较大影响^[8-10],从而影响到真空灭弧室的开断稳定性及可靠性。

真空灭弧室在投入使用前首先会进行老炼,以去除电极表面气体、氧化物等杂质^[11],改善电极表面状况,从而提升真空灭弧室耐压性能并改善弧后重击穿问题^[12]。此前相关研究大多都关注于老炼对于提升灭弧室抑制弧后重燃能力的意义^[12-15],而针对老炼过程中电极表面状况的变化过程,及不同电极表面状况下电弧特性的研究较少。文中针对一种应用于OLTC的平板电极在可拆卸真空灭弧室开展了电流老炼研究,探究了随着老炼的进行电极表面状况的变化过程、电弧扩散与电弧电压等电弧特性的变化,及电极表面状况与电弧特性变化的关系。

1 实验设置

为观察在老炼前后及过程中不同表面状况下的燃弧情况,采用电流老炼模式,使用一对电极进行多次燃弧,实现对电极的老炼。实验回路见图1,实验电流通过LC振荡回路产生,电容40 mF,电感250 μ H,产生的正弦电流频率为50 Hz,实验过程中,设置放电电流有效值为1.5 kA。晶闸管T用于触发导通主回路。

为方便观察,文中所开展的实验中真空电弧均在可拆卸式真空灭弧室内产生,实验中通过机械泵和分子泵不断抽气使灭弧室中气压维持在 10^{-4} ~ 10^{-3} Pa,灭弧室开距为5 mm,并装配有斥力机构,可以通过调节斥力机构电容充电电压改变其分闸速度。

实验采用中间突起的平板电极,其结构见图2,电极直径43 mm,接触面直径32 mm,材料为CuCr50。

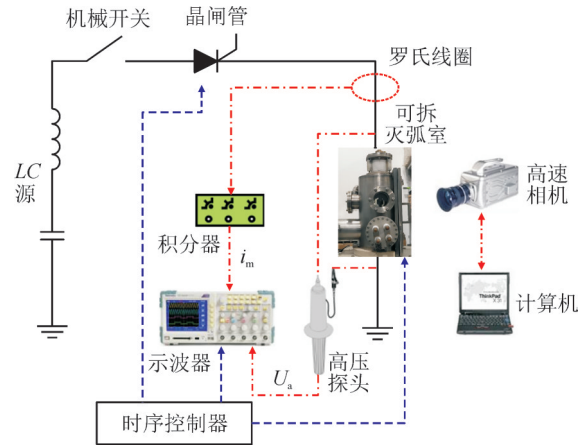


图1 实验回路图

Fig. 1 Circuit of experiment



图2 实验电极

Fig. 2 Electrode of experiment

实验过程中采用Phantom V10系列高速相机透过可拆卸真空灭弧室观察窗拍摄燃弧图像,拍摄速度为25 000幅/s,分辨率为400 px×104 px,曝光时间2 μ s,相机俯仰角设置为2°以更好地观察电极表面阴极斑点的运动情况。主回路电流和电弧电压分别通过罗氏线圈和高压探头进行测量。

2 实验结果与讨论

2.1 不同电极表面状况下的阴极斑点

当电极表面只有一部分区域清除了氧化层或污染物,而其他区域仍保持在污染状态时,在一次实验过程中能够同时观测到不同表面状况下产生的斑点,一种典型的分闸速度0.4 m/s下的实验结果见图3。需要说明的是,在文中所开展的实验中,真空电弧电流有效值较小,电弧在稳定状态下始终处于扩散态。

阴极轮廓已经绘制在图3中,从图3可以看到,在燃弧过程中电极上存在两种特征具有明显差异的斑点。第一种是在电极平面的中心区域处小范围存在,运动速度较快,并且亮度较低的斑点,如图3(a)中黄色标记处所示;第二种是在电极平面的边

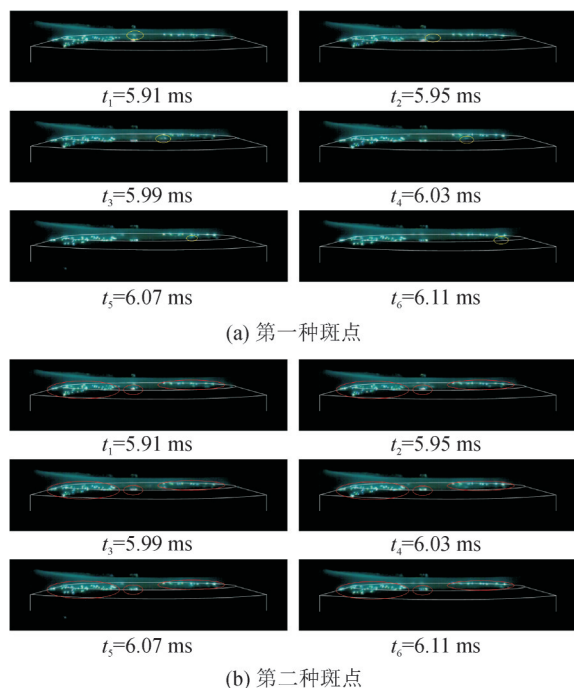


图3 两种类型阴极斑点

Fig. 3 Two kind of cathode spot

缘处大范围存在,运动速度慢,能够较为稳定的燃烧,并且亮度高的斑点,如图3(b)中红色标记处所示。

在本次燃弧实验后阴极表面状况见图4。电极平面中间处较为明亮的区域是尚未被烧蚀过或烧蚀较少的区域,由于表面较为光滑,反光度更好,显得更为明亮,这一区域由于未被充分烧蚀,表面仍带有氧化物及其他污染物;而电极平面边缘处亮度较低的区域是由于被阴极斑点烧蚀过而导致表面粗糙度上升,反光度下降的区域,这一区域已经过阴极斑点的充分烧蚀,表面较为清洁。

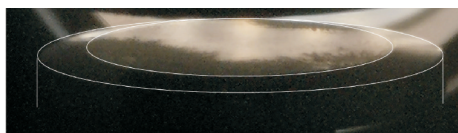


图4 电极表面状况

Fig. 4 Condition of electrode surface

Juttner将阴极斑点分为1型阴极斑点和2型阴极斑点,1型阴极斑点产生于被氧化或污染了的阴极表面,并且具有电弧电压较低、电弧电压噪声小、对电极的烧蚀率低、发光强度小、运动速度快等特点,而2型阴极斑点产生于清洁的阴极表面,电弧电压较高、电弧电压噪声大,并且对电极的烧蚀率高、发光强度大、运动速度慢^[9]。将实验过程中拍摄到的阴极斑点运动图与实验结束后拍摄的阴极表面状况图对比可以发现,实验中观察到的第一种阴极斑点均出现在烧蚀较少而带有较多污染物的电极

表面;第二种斑点则在被充分烧蚀过而较为清洁的电极表面稳定燃烧。根据两种斑点速度、亮度等特征的不同以及所在阴极表面状况的不同,可以确定实验中观察到的两种类型的斑点分别是1型斑点和2型斑点。

2.2 阴极斑点动态变化对电弧电压的影响

电弧燃烧状态最直接的外在表现就是电弧电压的大小,对于同一电流等级下的燃弧情况,电弧电压则直接反映了电弧能量的大小^[16]。在文中进行的实验中,一种典型的分闸速度1.0 m/s下的电弧电压波形见图5。

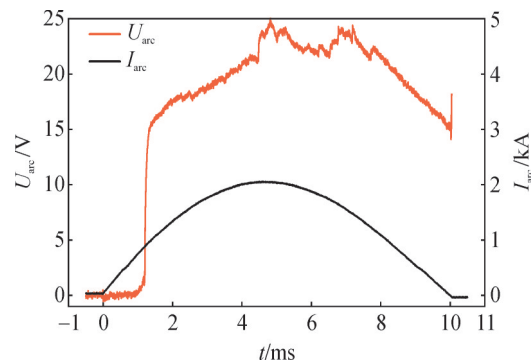


图5 分闸速度1.0 m/s下的电弧电压和电弧电流波形

Fig. 5 Arc voltage and arc current under opening speed 1.0 m/s

在形成电弧前,电弧电压随电极间的接触电阻不断增大而缓慢上升;在电极分离形成电弧后,电弧电压迅速上升到15 V左右的一个稳定值,之后在电流上升、电极间距增加等因素的共同作用下逐渐上升,在电流达到峰值后的一定时间内在23 V上下波动,之后逐渐下降,直到电流过零前,电弧电压又降回15 V左右。在文中进行的实验中,观测到电弧电压会受到阴极斑点的运动及熄灭等动态变化的影响而出现波动,在本次实验4~7 ms时间内尤其明显。具体分析如下。

在尚未老炼完全的电极表面的燃弧过程中,1型斑点由于运动速度快,在电极平面上快速移动,运动到平面边缘处,靠近电极倾斜面时,使该处的等离子体密度升高,而由于电极倾斜面被烧蚀较少,含有较多的污染物,使得其更易在高等离子体密度的作用下产生新的阴极斑点^[17],见图6。因此在阴极斑点运动到电极平面边缘处时,通常会继续运动到电极倾斜面处,即继续向远离电极中心的方向运动,也就导致部分阴极斑点会运动到电极侧面,如图6中的红色标记处的阴极斑点所示。

当阴极斑点运动到电极倾斜面,甚至是侧面时,由于等离子体的损失,局部等离子体密度减小,

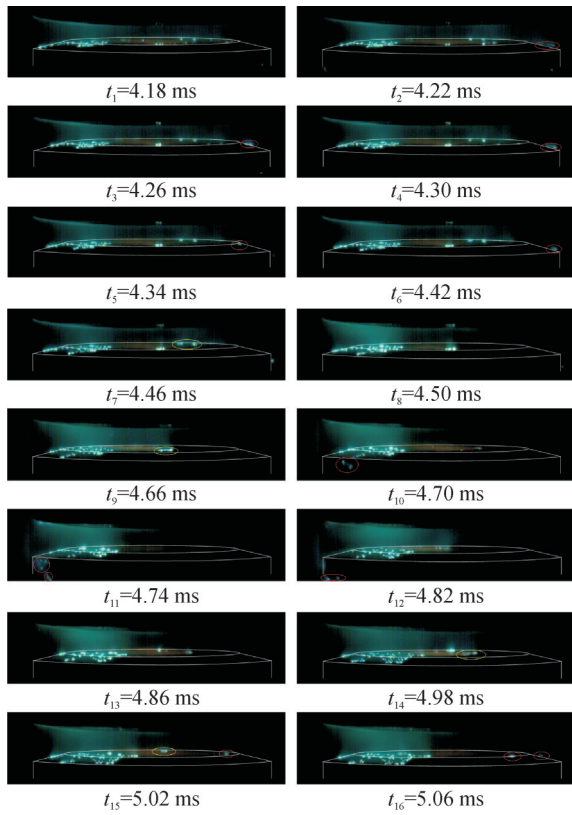


图6 分闸速度 1.0 m/s 下的电弧形态

Fig. 6 Cathode spot under opening speed 1.0 m/s

不易产生新的斑点,表现为此处的斑点突然熄灭,如图6中的黄色标记处所示,在 $t_7 \sim t_8$ 、 $t_9 \sim t_{10}$ 、 $t_{14} \sim t_{16}$ 时间内,电极边缘处的部分阴极斑点熄灭,波形上电弧电压会突然升高见图7,电弧电压4~5.2 ms波形中标记处。 $t_{11} \sim t_{12}$ 时刻,大量阴极斑点出现在电极侧面,并且电弧电流接近峰值,在两种因素的共同作用下,电弧电压达到最大值。而电极倾斜面上不断出现的阴极斑点则会使整个燃弧过程中电弧电压不断出现小幅的波动。

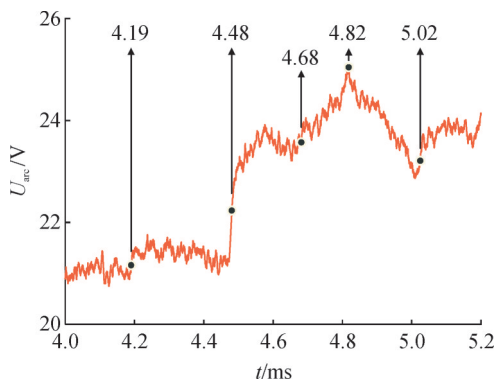


图7 分闸速度 1.0 m/s 下的电弧电压波形细节

Fig. 7 Details of arc voltage under opening speed 1.0 m/s

2.3 电极老炼对阴极斑点及电弧电压的影响

利用1型阴极斑点能量密度高,在燃烧过程中能够清除电极表面的氧化物等杂质、具有清洁作用的特性,进行多次燃弧实验,可以充分清除电极表

面杂质^[18],从而达到老炼的目的。本次实验中不同老炼程度下电极表面状况见图8,从图8可以看到,随着老炼的进行,电极上亮度较低的区域所占面积越来越大,即越来越多的表面被充分烧蚀过^[19-22]。

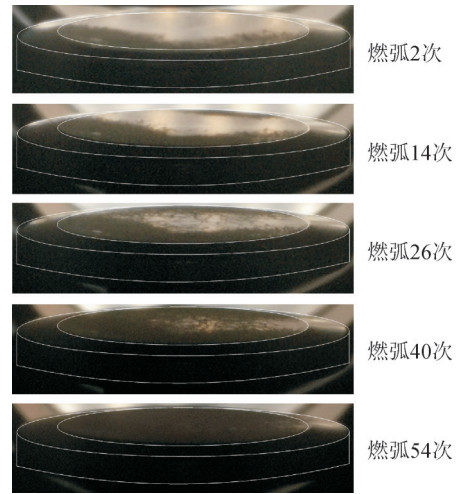


图8 不同老炼程度下的电极表面状况

Fig. 8 Conditions of electrode surface at under different aging degree

随着老炼进行,电极表面上被清洁过的区域越来越大,燃弧过程中阴极斑点的特性也会发生变化。不同老炼程度下分闸速度0.4 m/s的电弧形态见图9。第2次燃弧过程中有大量阴极斑点从电极边缘处运动到电极侧面,如图9中红色标记处所示;电极平面中心处由于未被充分老炼,产生了部分1型斑点,如图9中黄色标记处所示;并且阴极斑点在电极上能够稳定燃烧的区域较小。第10次燃弧过程中电极表面边缘处已经被初步老炼过,快速运动到电极边缘及电极侧面的阴极斑点明显减少,但电极平面中心尚未被老炼过的区域1型斑点存在;阴极斑点稳定燃烧的区域增加。第54次燃弧过程中,整个电极表面已经被充分烧蚀过,斑点运动较为稳定,没有出现运动到电极侧面的阴极斑点,仅在电极倾斜面处出现了局部区域的部分阴极斑点熄灭的现象。可以看到随着老炼的进行,阴极斑点中2型斑点所占比例越来越高,斑点运动更加稳定,运动到侧面的斑点更少,并且也能够较为稳定的燃烧。

不同老炼程度下分闸速度0.4 m/s的电弧电压、电流波形见图10。在起弧后,根据电弧电压的幅值变化可以将其在燃弧过程中分为3个阶段,分别是上升阶段、稳定阶段和下降阶段。随着老炼的进行,电弧电压上升阶段结束时间由6 ms变为4 ms,所占时间更短,并且上升速度更慢,稳定阶段所占时间更长,并且波动减小,电弧电压的稳定值在充分老炼后只有17.8 V。老炼前后下降阶段均在7 ms

左右开始, 并且在熄弧时刻弧压均在 15 V 左右, 但充分老练的电极下电弧电压下降速度更慢。

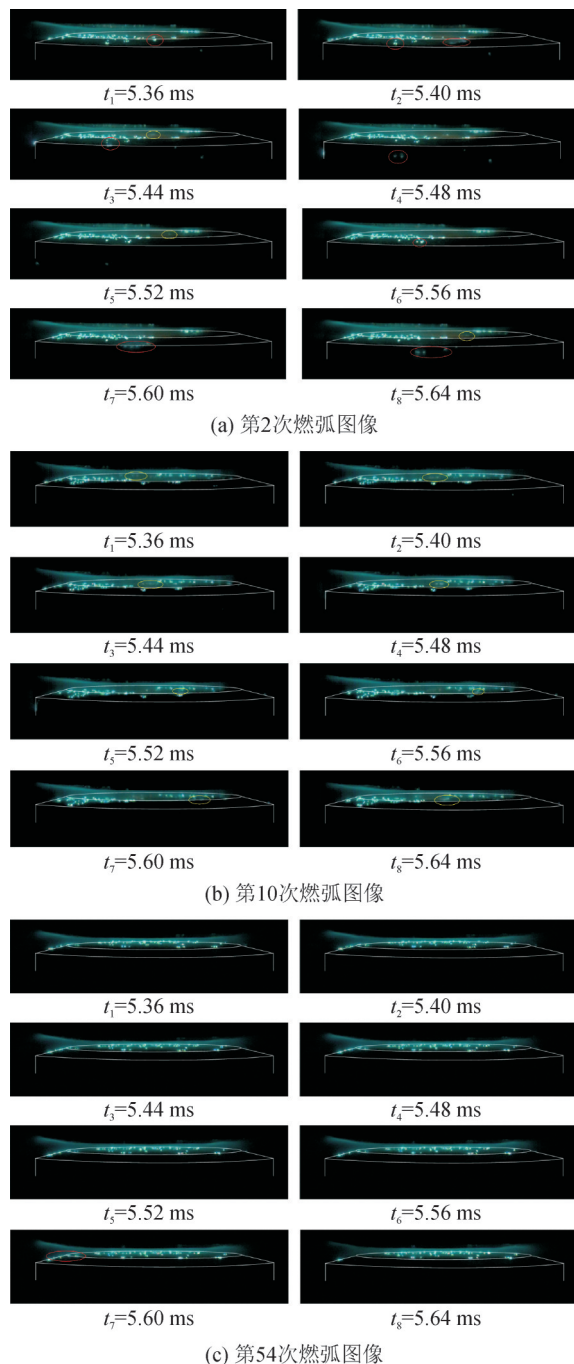


图9 不同老炼程度下分闸速度 0.4 m/s 的电弧形态
Fig. 9 Cathode spot at opening speed 0.4 m/s under different aging degree

电弧电压稳定值更低是由于随着老炼的进行, 阴极斑点能够稳定燃烧的区域面积更大, 分布更加分散, 电极间等离子体密度相对较小, 弧柱电阻随之减小, 在电弧电压上就体现为稳定值的下降。电弧电压在起弧时刻基本一致, 均在 15 V 左右, 燃弧过程中随着电极间距与电弧电流不断增大, 充分老练后的电极上阴极斑点能够更快的扩散开来, 等离

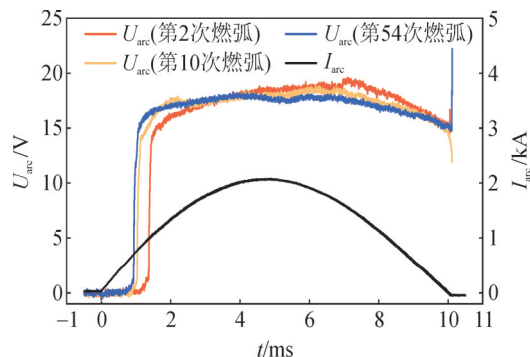


图10 不同老炼程度下分闸速度 0.4 m/s 的电压电流波形
Fig. 10 Arc voltage and arc current at opening speed 0.4 m/s under different aging degree

子体密度不会出现过高的现象, 使电弧电压在上升阶段变化速度较慢, 而未充分老炼的电极上阴极斑点只能在局部区域内稳定燃烧, 等离子体密度上升速度更快, 使得电弧电压在上升阶段的变化速度更快。下降阶段的电弧电压变化与之同理。电弧电压的波动逐渐减小主要是由于运动到侧面的阴极斑点越来越少, 等离子体损耗变少, 电弧燃烧更加稳定。

不同老炼程度下分闸速度 1.0 m/s 的电弧形态见图 11, 相比于 0.4 m/s, 由于分闸速度快的情况下电极间距大, 有利于等离子体向外扩散, 使得在更大的分闸速度下, 无论是老炼前还是老炼后, 运动到电极倾斜面或侧面的阴极斑点数量都明显多于小速度下的, 如图 11 中红色标记处所示。在老炼尚未完全时, 大速度下阴极斑点运动更为剧烈, 会在未被充分烧蚀过的表面处出现大量 1 型斑点, 如图 11(a) 中黄色标记处所示, 阴极斑点主要集中在电极左侧区域燃烧。当电极表面被充分清洁过后, 2 型阴极斑点在整个电极表面上均匀分布, 并且运动较为稳定, 如图 11(b) 所示, 电极倾斜面与侧面上的阴极斑点数目有所减少, 很少出现大量阴极斑点突然熄灭的现象。

不同老炼程度下分闸速度 1.0 m/s 的电弧电压、电流波形见图 12。老炼前电弧电压较高, 并且在电流峰值前后多次出现较大幅度的波动, 在老炼后, 电弧电压降低并且波动幅度明显减小。但由于分闸速度快的情况下开距较大, 弧柱区电阻更大, 分闸速度快的情况下电弧电压稳定值在 21.1 V 左右, 明显高于分闸速度较低时的电弧电压稳定值。

通过对比老炼前期不同分闸速度下的燃弧过程可以看到, 大速度下阴极斑点运动更为剧烈, 尤其是在未被充分烧蚀过的区域上, 会出现大量 1 型阴极斑点反复烧蚀, 这在一定程度上有利于老炼的

进行。

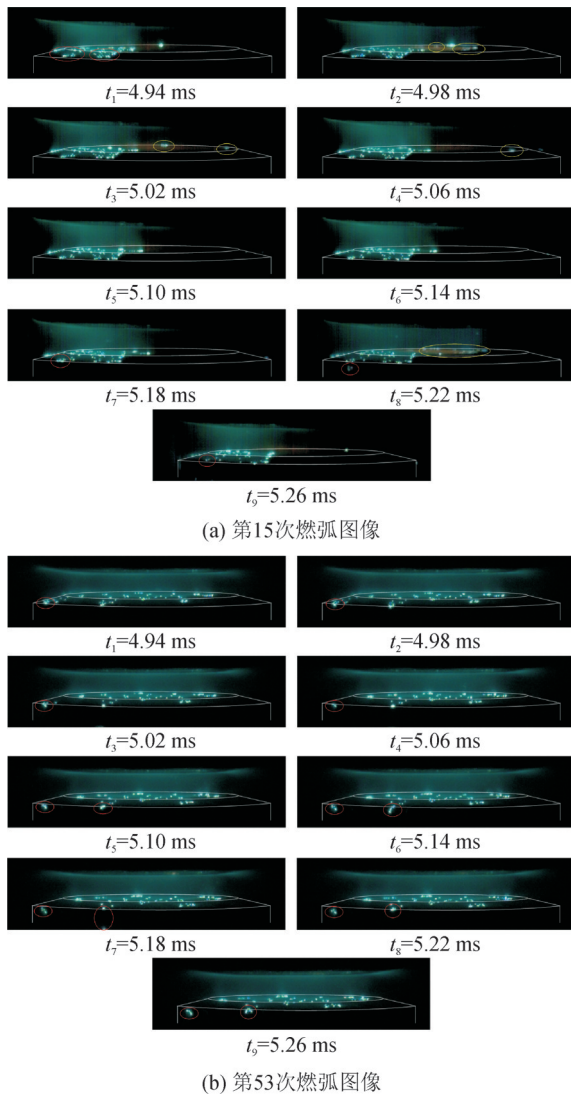


图 11 不同老炼程度下分闸速度 1.0 m/s 的电弧形态

Fig. 11 Cathode spot at opening speed 1.0 m/s under different aging degree

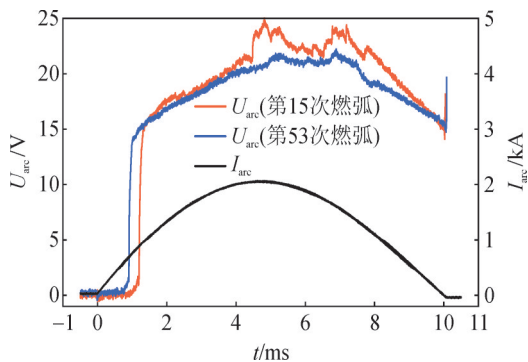


图 12 不同老炼程度下分闸速度 1.0 m/s 的电压电流波形

Fig. 12 Arc voltage and arc current at opening speed 1.0 m/s under different aging degree

电弧电压不仅受斑点分布、电极开距的影响,同样受阴极斑点类型的影响,1型斑点下的电弧电压要低于2型斑点下的,但实验结果却表现为随着

老炼的进行,1型斑点越来越少时,电弧电压反而降低,作者认为这主要是由于随着电极表面杂质被逐渐清除,斑点分布更加均匀,运动更加稳定,有利于电弧电压降低,并且在刚开始老炼时,1型斑点烧蚀过的区域会立即产生2型斑点,电弧电压并没有体现出1型斑点低电压的特点。

3 结论

文中针对应用于有载分接开关的平板电极进行了老炼实验,分析了随着老炼进行电弧扩散及电弧电压特征的变化,得到了以下结论:

1)随着老炼的进行,在1型阴极斑点的清洁作用下,电极表面的污染物被逐渐清除;同时2型阴极斑点数量增加,阴极斑点运动更加稳定,电弧电压降低并且波动减小。

2)通过燃弧过程中电弧电压的特征可以对老炼程度进行判断,老炼完成后,电弧电压基本稳定,不再呈现出随燃弧试验的进行而不断下降的特点,并且在高分闸速度下电弧电压也更为稳定,不再出现大幅度的波动。根据文中实验结果,对于直径43 mm的平板电极,使用有效值1.5 kA的工频电流进行约50次燃弧时长9 ms的试验后,整个电极表面已被均匀烧蚀,并且后续燃弧过程中电弧电压较为稳定,表明老炼已基本完成。

3)在分闸速度快的情况下,老炼前后阴极斑点运动均更不稳定、电弧电压均更高且波动更大。在老炼过程中,电极表面在分闸速度快的情况下会出现更多有利于老炼进行的1型阴极斑点。

参考文献:

[1] 刘雪丽,李金忠,高飞,等. ± 800 kV换流变压器用真空式有载分接开关关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5350-5356.
LIU Xueli, LI Jinzhong, GAO Fei, et al. Key technology research for vacuum type on-load tap-changer of ± 800 kV direct current converter transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5350-5356.

[2] 沈大中, KRAEMER A, DOHNAL D. 真空有载分接开关在高压直流换流变压器中的运用[J]. 南方电网技术, 2011, 5(1): 25-28.
SHEN Dazhong, KRAEMER A, DOHNAL D. Application of vacuum on-load tap-changers in HVDC converter transformers[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1): 25-28.

[3] 王绍武,李鹏,李金忠,等. 变压器真空有载分接开关研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6893-6907.
WANG Shaowu, LI Peng, LI Jinzhong, et al. Overview of transformer vacuum-type on-load tap changers[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6893-6907.

- [4] 王季梅. 真空开关的现状与发展趋势[J]. 电力设备, 2005, 6(2):1-5.
WANG Jimei. Present situation and development tendency of vacuum switch[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(2):1-5.
- [5] 史宗谦,贾申利,朱天胜,等. 真空直流断路器高速操动机构的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(3):18-22.
SHI Zongqian, JIA Shenli, ZHU Tiansheng, et al. Investigations on high-speed actuator of vacuum DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3):18-22.
- [6] 张德明. 浅谈真空有载分接开关研发技术的要素(上)[J]. 变压器, 2014, 51(7):35-40.
ZHANG Deming. Brief discussion on key factors of development technology of vacuum on-load tap-changer[J]. Transformer, 2014, 51(7):35-40.
- [7] 段舒帆,成立,罗豪,等.基于虚实融合的变压器油中气体输运过程数字孪生方法研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(6):68-77.
DUAN Shufan, CHENG Li, LUO Hao, et al. Research on a digital twin method for gas transport process in transformer oil based on cyber-physical integration[J]. Smart Power, 2025, 53(6):68-77.
- [8] BUSHIK A I, JÜTTNER B, PURSCH H. On the nature and the motion of arc cathode spots in UHV[J]. Beiträge aus der Plasmaphysik, 1979, 19(3):177-188.
- [9] 陈涛,王贝贝. 中压真空断路器抗震性能仿真与试验分析[J]. 电器与能效管理技术, 2025(8):45-51.
CHEN Tao, WANG BeiBei. Simulation and experimental analysis of seismic performance for medium voltage vacuum circuit breakers [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2025(8):45-51.
- [10] 侯赛,成润坤,刘达. 基于二次采样和集成学习方法的变压器故障预测[J]. 智慧电力, 2024, 52(7):40-47.
HOU Sai, CHENG Runkun, LIU Da. Transformer fault forecast based on re-sampling and integrated learning approach[J]. Smart Power, 2024, 52(7):40-47.
- [11] 何维娜,常义,葛媛媛,等. 真空灭弧室老炼技术研究现状分析及展望[J]. 机电信息, 2016(3):70-71.
HE Weina, CHANG Yi, GE Yuanyuan, et al. Current situation analysis and prospect of vacuum interrupter conditioning technology[J]. Mechanical and Electrical Information, 2016(3):70-71.
- [12] 何俊佳,邹积岩,程礼椿. 真空灭弧室的火花老炼[J]. 高压电器, 1994, 30(1):18-21.
HE Junjia, ZOU Jiyang, CHENG Lichun. Spark conditioning of HV vacuum interrupters[J]. High Voltage Apparatus, 1994, 30(1):18-21.
- [13] 李世民,江希茜,李镇廷,等. 脉冲电压老炼过程中真空击穿机制演化机理[J]. 高电压技术, 2023, 49(11):4790-4797.
LI Shimin, JIANG Xiqian, LI Zhenting, et al. Evolution law of vacuum breakdown mechanisms in impulse voltage conditioning process[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11):4790-4797.
- [14] 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.
YAO Shibin. Influence of voltage and current aging on the quality of vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(6):52-55.
- [15] 陈献峰,王亚平,丁秉钧. 老炼机理分析及影响老炼效果的因素[J]. 高压电器, 1998, 34(2):47-51.
CHEN Xianfeng, WANG Yaping, DING Bingjun. Theory of conditioning and the factors that affect conditioning[J]. High Voltage Apparatus, 1998, 34(2):47-51.
- [16] 史宗谦,贾申利,王立军,等. 真空电弧电压与电弧形态关系的实验研究[J]. 高压电器, 2004, 40(4):250-252.
SHI Zongqian, JIA Shenli, WANG Lijun, et al. Experimental investigation of the relation between vacuum arc voltage and arc appearance[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(4):250-252.
- [17] 罗智荣,黄丰,郭淳,等. 基于多物理场仿真的油浸式变压器振动特性分析及影响因素研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(11):48-55.
LUO Zhirong, HUANG Feng, GUO Chun, et al. Vibration characteristics analysis and influencing factors of oil-immersed transformer based on multi-physical field simulation[J]. Smart Power, 2024, 52(11):48-55.
- [18] 蔡重凯,李电,洪金琪,等. 真空断路器开合电容电流老炼试验[J]. 浙江电力, 2014, 33(10):6-10.
CAI Chongkai, LI Dian, HONG Jinqi, et al. Aging test of opening and closing capacitive current of vacuum circuit breaker[J]. Zhejiang Electric Power, 2014, 33(10):6-10.
- [19] 何国阳,汲胜昌,祝令瑜,等. 在运换流变压器噪声特性及噪声预测方法[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5):117-127.
HE Guoyang, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Noise characteristics and prediction methods of operating converter transformers[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5):117-127.
- [20] 李静,高万瑞,段薇,等. 直流塑壳断路器开断时的飞弧现象以及抑制措施[J]. 电工技术学报, 2025, 40(19):6329-6341.
LI Jing, GAO Wanrui, DUAN Wei, et al. Arc-over phenomenon and inhibition measures when dc molded case circuit breaker is breaking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(19):6329-6341.
- [21] 张德文,张健,曲利民,等. 基于 PSO-ELM 的变压器油纸绝缘状态无损评估方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3):201-208.
ZHANG Dewen, ZHANG Jian, QU Limin, et al. The assessment method of transformer oil-paper insulation state based on PSO-ELM [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3):201-208.
- [22] 王伟,帅智康,李杨,等. 基于固态断路器主动注入式直流故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8):2360-2370.
WANG Wei, SHUAI Zhikang, LI Yang, et al. Active injection DC fault location method based on solid state circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8):2360-2370.
- 刘心悦(1996—),女,本科,助理工程师,主要从事真空开断技术领域研究(E-mail: cqulixinyue@163.com)。
史宗谦(1975—),男,博士,教授,博导,主要从事真空放电等离子体理论及应用领域的研究(通信作者)(E-mail: zqshi@mail.xjtu.edu.cn)。