

真空电弧电压与电弧形态关系的实验研究

史宗谦¹, 贾申利¹, 王立军¹, 王政²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 华光电力电子公司, 辽宁 锦州 121001)

Experimental Investigation of the Relation between Vacuum Arc Voltage and Arc Appearance

SHI Zong-qian¹, JIA Shen-li¹, WANG Li-jun¹, WANG Zheng²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Huaguang Power and Electronic Company, Jinzhou 121001, China)

摘要: 在可拆卸式真空灭弧室中对平板式电极进行了试验,通过高速电荷耦合器件(CCD)摄像机拍摄的电弧形态照片及示波器记录的电弧电压波形,研究了真空电弧的电弧电压与电弧形态的关系。作为对比,也对杯状纵磁触头进行了一些试验。

关键词: 真空电弧; 电弧电压; 电弧形态; 阳极斑点

中图分类号: TM561

文献标识码: A

Abstract: The arc voltage of vacuum arc has close relation with the appearance of vacuum arc. In this paper, some experiments are conducted with flat-plate electrodes in a demountable vacuum chamber. The relations between arc voltage and arc appearance are investigated through the images of arc column taken by high-speed charge coupled device (CCD) video camera and the waveform of arc voltage acquired by oscilloscope. Some experiments are carried out with cup-shaped axial magnetic field electrodes for comparison.

Key words: vacuum arc; arc voltage; arc appearance; anode spot

1 引言

真空电弧的电弧电压由阴极压降、弧柱压降和阳极压降构成。阴极压降大致等于阴极材料的电离势,而电弧电流的变化对其影响不大^[1]。从电弧电压的平均值来看,当电流较小,电弧为扩散态时,电弧电压主要由阴极压降构成,弧柱压降和阳极压降很小。当电弧电流增大时,由于弧柱等离子体中粒子的碰撞更加频繁,因此弧柱压降增大,而阳极压降也有所增加,从而引起电弧电压的升高。当电流继续增大,并且趋于形成阳极斑点时,阳极压降明显增大,从而引起电弧电压的显著提高。

从电弧电压的噪声来看,一方面阴极斑点不断熄灭、再生和分裂,会在电弧电压上叠加一个高频振

荡波形^[2]。另一方面在没有纵向磁场的情况下,由于弧柱等离子体向弧隙外扩散及阴极斑点运动到触头侧面会造成等离子体损耗,这也是引起电弧电压平均值及其噪声增大的主要原因。

纵向磁场可以有效地抑制真空电弧等离子体的径向扩散,还可以约束阴极斑点的运动,抑制阴极斑点向触头侧面的运动,而且可以抑制弧柱的收缩。纵向磁场的上述作用可以降低电弧电压的平均值,从而减小电弧能量,使真空电弧在较大的电流下仍能维持在扩散态,并且可以减小电弧电压的噪声。

可见真空电弧的电弧电压与弧柱形态、阴极斑点的分布及是否施加纵向磁场有着密切的联系,而且在同样的电流下,电弧电压直接反映了电弧能量的大小。因此真空电弧电压是研究真空电弧理论的一个重要的途径。笔者将通过在可拆卸式灭弧室中进行的试验来研究这一问题。

2 实验装置

试验均在可拆卸式真空灭弧室中进行,每次试验时灭弧室内气体压力都在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ Pa 的范围内,并且由涡轮分子泵持续抽气。试验电流由振荡频率为 50 Hz 的单频振荡回路提供,并采用触发的方式来引燃真空电弧。试验中通过高速 CCD 摄像机来拍摄弧柱形态,高速摄像机的曝光时间设置为 $1/6\ 000$ s。电弧电流波形通过串接在回路中的无感分流器采样,电弧电压波形由 TDS460A 型示波器的高压探头测量。试验中触头片材料为 CuCr25,触头直径为 56 mm,触头开距为 10 mm。

3 试验结果及分析

利用上述装置进行了大量的试验,限于篇幅,仅介绍一些具有一定规律性和代表性的试验结果。

3.1 无纵向磁场时小电流真空电弧的电弧电压与电弧形态的关系

图1为采用平板式触头,电弧电流峰值 $I_{peak}=1483\text{ A}$ 时的电弧电流和电压的波形图。图2为某些时刻的弧柱图像。

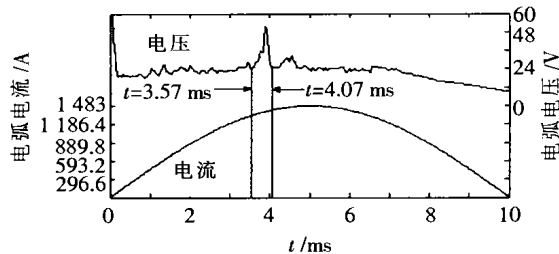


图1 平板式触头的电弧电流和电压波形图 ($I_{peak}=1483\text{ A}$)

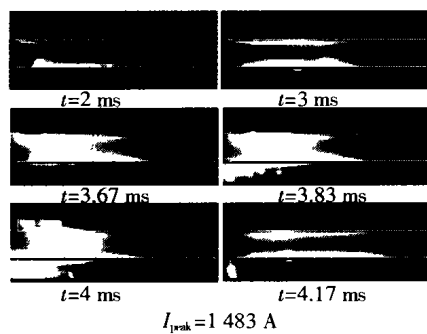


图2 平板式触头弧柱形态照片 (下面的电极为阴极)

从图1可以看出,不加纵向磁场时电弧电压的噪声整体上都较大,这一方面是因为极间等离子体向弧隙外扩散,另一方面是因为有一些阴极斑点运动到触头侧面而引起的离子损耗。在图1中 $t=3.57\text{ ms}$ 时,电弧电压出现了一个较大的噪声尖峰,这一电压尖峰持续时间约 0.5 ms ,而在该尖峰前后电弧电压的噪声相对较低。从图2可以看出, $t=2\text{ ms}$ 和 $t=3\text{ ms}$ 时弧柱较暗,虽然有个别阴极斑点运动到电极的侧面,但电弧仍在触头之间的弧隙燃烧。 $t=3.67\text{ ms}$ 时出现明亮的弧柱,而从 $t=3.83\text{ ms}$ 和 $t=4\text{ ms}$ 时的弧柱照片可以明显看出,电弧在触头侧面燃烧(偏烧),这说明有大量的阴极斑点运动到了触头侧面。从图1可以看出,电压尖峰所跨越的时间为 $3.57\sim 4.07\text{ ms}$,这一时间与图2中电弧偏烧的时间相同。从这一点来看,电弧电压噪声的突然升高与大量阴极斑点运动到电极侧面而引起电弧偏烧有密切的关系。从图2中 $t=4.17\text{ ms}$ 时的照片可以看出,虽然仍有阴极斑点位于触头侧面,但电弧偏烧已明显减弱,而从图1来看,此时电弧电压已经明显下降。

3.2 无纵向磁场时大电流真空电弧的电弧电压与电弧形态的关系

图3为采用平板式触头, $I_{peak}=8651\text{ A}$ 时的电弧电流和电压的波形图。图4为某些时刻的弧柱图像。

在前面的试验中电弧电流较小 ($I_{peak}=1483\text{ A}$),真空电弧为扩散态,虽然电压噪声较大,但电弧电压的平均值较低。而当电流较大且电弧集聚时的电弧

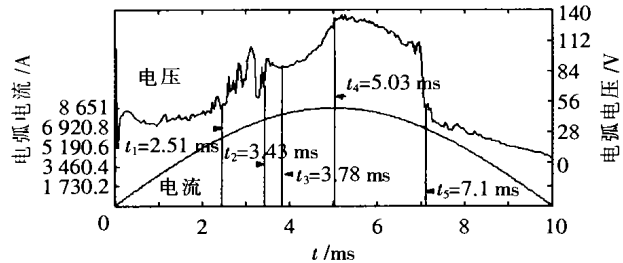


图3 平板式触头的电弧电流和电压波形图 ($I_{peak}=8651\text{ A}$)

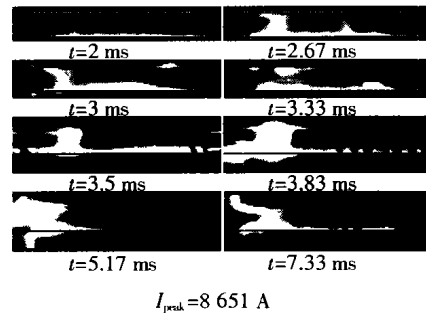


图4 平板式触头弧柱形态照片 (下面的电极为阴极)

电压明显与 $I_{peak}=1483\text{ A}$ 时的电弧电压不同。从图3和图4可以明显看出真空电弧不同的发展阶段。

(1) 图3中 $t_1=2.51\text{ ms}$ 之前的电弧电压平均值和电压噪声相对较低,在这一段时间内电弧电流较小,电弧为扩散态,图4中 $t=2\text{ ms}$ 的弧柱照片可以看出阳极区亮度很低。

(2) 图3中 $t_1=2.51\text{ ms}$ 和 $t_2=3.43\text{ ms}$ 之间的电弧电压的平均值增大,而电压噪声的增大更为明显。造成电弧电压噪声升高的原因是点状阳极斑点的出现。从图4中 $t=2.67\text{ ms}$, $t=3\text{ ms}$ 和 $t=3.33\text{ ms}$ 的弧柱照片可以明显看出点状阳极斑点的形成过程。 $t=2.67\text{ ms}$ 时,阳极表面出现点状的发光点,但亮度不是很高;而 $t=3.33\text{ ms}$ 时,点状阳极斑点的亮度已经非常高,并且其面积也比 $t=2.67\text{ ms}$ 时大。

(3) 图3中 $t_2=3.43\text{ ms}$ 和 $t_3=3.78\text{ ms}$ 之间的区域电弧电压的噪声开始减小,从图4中 $t=3.5\text{ ms}$ 和 $t=3.83\text{ ms}$ 时的弧柱照片来看,这一时间段对应着阳极斑点的形成时间。 $t=3.5\text{ ms}$ 时,电弧进入阳极斑点模式,出现明亮的弧柱,但弧柱和阳极斑点区域的面积较小;到 $t=3.83\text{ ms}$ 时,弧柱和阳极斑点区域的面积都增大并维持在一个稳定的状态。文[3]研究了形成稳定的阳极斑点(阳极斑点的面积扩张到其稳定值的90%左右)所需的时间约为 0.1 ms ,从图3中可以看出,形成稳定的阳极斑点所需时间约为 0.3 ms 。

(4) 图3中 $t_3=3.78\text{ ms}$ 和 $t_4=5.03\text{ ms}$ 之间的区域内电弧电压的平均值明显升高,但电压噪声很小。从图4中 $t=3.83\text{ ms}$ 时的弧柱图像来看,这一时间段为阳极斑点稳定燃烧的时间。

(5) 图3中 $t_4=5.03\text{ ms}$ 和 $t_5=7.1\text{ ms}$ 之间的区域内电弧电压的平均值也较高,其电压噪声虽然比电弧为点状阳极斑点模式时低的多,但明显比 $t_3=3.78\text{ ms}$

和 $t_4=5.03$ ms 之间的电压噪声高一些。从图 4 中 $t=5.17$ ms 时的弧柱照片来看,此时虽然弧柱的亮度仍然很高,但 $t=5.17$ ms 时的弧柱形态与 $t=3.83$ ms 时的弧柱形态有所不同。 $t=3.83$ ms 时弧柱贯穿阴极和阳极之间的弧隙,而 $t=5.17$ ms 时阳极和阴极所发出的等离子体射流开始分离。文[4]的研究表明,当真空电弧处于阳极斑点模式时,如果阳极射流能够到达阴极或与阴极射流接触,则电弧电压噪声相对较小。这一结论与上述试验现象是相同的。

(6)图 3 中 $t_5=7.1$ ms 到电流半波结束这一段时间内,真空电弧逐渐从阳极斑点模式转变为扩散态,电弧电压逐渐减小。从图 4 中 $t=7.33$ ms 时的弧柱照片来看,弧柱亮度明显降低,电弧趋于扩散。

3.3 纵向磁场中大电流真空电弧的电弧电压和电弧形态

当加入纵向磁场时真空电弧的电弧电压与无纵向磁场时相比,电弧电压的平均值和电压噪声都明显减小。而且在纵向磁场中同一对触头在同样电流时多次试验的电弧电压和电弧形态的重复性要比无纵向磁场时好的多。笔者对杯状纵磁触头进行了试验,触头杯开 6 个斜槽(17°),触头片上也开 6 个槽。图 5 为 $I_{\text{peak}}=11\ 617$ A 时的电弧电流和电压波形,图 6 为某些时刻的弧柱照片。

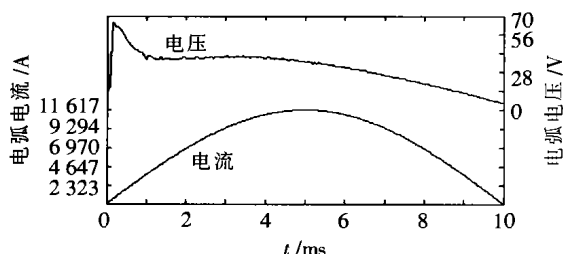


图 5 杯状纵磁触头的电弧电流和电压波形 ($I_{\text{peak}}=11\ 617$ A)

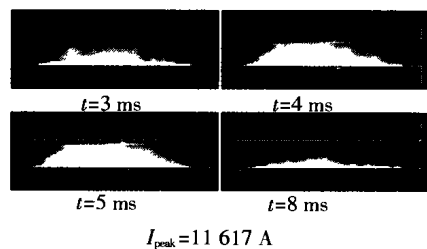


图 6 平板式触头弧柱形态照片(下面的电极为阴极)

(上接第 249 页) 表达式计算补偿导纳。而基于瞬时值的控制算法则可直接利用瞬时无功功率理论得出有功和无功分量,通过一次低通滤波后,将直流值直接代入补偿导纳的表达式计算即可,思路简单,计算量小。根据负荷电流的实际情况设计合适的滤波器还可进一步缩短延时,增强补偿的实时性。

参考文献:

[1] 孙树勤. 无功补偿的矢量控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

从图 6 来看,加入纵向磁场后弧柱亮度明显比无纵向磁场时低的多,而且电弧在阴极和阳极表面所占区域都明显增大,这体现了纵向磁场抑制电弧收缩的作用。从图 5 来看,加入纵向磁场后电弧电压的平均值比无纵向磁场时低的多,而且非常光滑,这体现了纵向磁场限制极间等离子体向弧隙外扩散及抑制阴极斑点向电极侧面运动的作用。

4 结语

(1)小电流真空电弧在无纵向磁场时的电弧电压噪声的突然升高与电弧在触头侧面的偏烧有直接的关系。

(2)大电流真空电弧的电弧电压平均值和电压噪声的增大与点状阳极斑点的形成有直接的关系。

(3)大电流真空电弧的电弧电压平均值增大,但电压噪声的明显降低标志着电弧在阳极斑点模式稳定燃烧。

(4)大电流真空电弧处于阳极斑点模式时,如果阳极射流能够到达阴极或与阴极射流接触,则电弧电压噪声明显低于阳极射流与阴极射流分开时的电压噪声。

(5)纵向磁场可以抑制阴极斑点向触头侧面的运动,可以抑制弧柱的收缩,增大电弧对触头表面的利用率,在纵向磁场的作用下电弧电压的平均值及其噪声显著减小。

参考文献:

[1] 王季梅. 真空开关理论及其应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
[2] 张节容, 钱家骊, 王伯瀚. 高压电器原理和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
[3] R Fischer. Investigations into Anode Spot Formation of Switching Arcs in Vacuum [M]. Dissertation, Rheinisch-westfalischen Tech. Hoch., Aachen, 1985.
[4] L P Harris. Small-scale Anode Activity in Vacuum Arcs [J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 1982, 10(3): 173-180.

作者简介:史宗谦(1975-),男,博士研究生,主要从事真空电弧理论和真空开关领域纵向磁场应用方面的研究工作。

[2] T J 米勒. 电力系统无功功率控制 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
[3] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
[4] 姚天任, 江太辉. 数字信号处理 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000.
[5] 邹鲲, 袁俊泉, 龚享钦. Matlab 6.X 信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

作者简介:范瑞祥(1977-),男,湖南省湘潭人,硕士研究生,研究方向为电力系统谐波抑制和无功补偿。