

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.005

不同磁场方式下真空开关电弧电压特性及其直流 开断性能研究

李 强^{1,2}, 刘 伟², 张延超², 刘 剑², 付 宸¹, 马 慧¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 西安西电高压开关有限责任公司, 西安 710000)

摘要: 文中研究不同磁场方式下真空电弧电压特性及其直流开断性能, 获得不同磁场方式对真空电弧直流开断性能和燃弧过程中电弧电压变化的影响规律。实验研究了不同磁场方式作用下真空电弧的直流开断性能, 结果表明在脉振横向磁场作用下的平板触头直流开断能力最强, 最大可开断DC为900 V/900 A; 在脉振横向磁场作用下的平板触头成功直流开断DC为400 V/400 A; 在纵磁触头与螺旋槽触头条件下, 直流开断能力较弱, 无法开断直流电流。研究对比了不同磁场方式作用下真空电弧开断过程电弧电压变化规律, 结果表明横向磁场作用下的真空直流开断过程中的电弧电压具有很强的不稳定性, 易发生剧烈的振荡。横磁类型触头的电弧电压在燃弧过程中发生了剧烈振荡, 特别是外施横磁平板触头在8 kA电流条件下电弧电压振荡幅值最高可达250 V。

关键词: 磁场方式; 真空电弧; 直流开断; 电弧电压特性

Research on Arc Voltage Characteristics and Direct Current Interruption Performance of Vacuum Switch with Different Magnetic Field Configurations

LI Qiang^{1,2}, LIU Wei², ZHANG Yanchao², LIU Jian², FU Chen¹, MA Hui¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an Xidian High Voltage Apparatus Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: In this paper the arc voltage characteristics and DC performance of vacuum arcs under different magnetic field configurations are researched, and the influence patterns of various magnetic field configurations on the DC interruption capability and arc voltage evolution during arcing process are obtained. The DC interruption performance of vacuum arcs under different magnetic field configurations is experimentally investigated. The results show that the flat-type contact subjected to a pulse transverse magnetic field exhibits the strongest DC interruption capability, achieving a maximum interruption capacity of 900 V/900 A. Under the action of a pulsating transverse magnetic field, the flat contact configuration successfully achieves DC interruption at 400 V/400 A. In contrast, DC interruption capability of both the axial magnetic field contact and the spiral-groove contacts exhibit weak inferior DC interruption capabilities and are unable to interrupt DC current. The variation of arc voltage during vacuum arc interruption under diverse magnetic field configurations are compared and analyzed. The result shows that the arc voltage during DC vacuum interruption under transverse magnetic field presents severe instability and is prone to intense oscillations. Violent oscillations occur in the arc voltage of transverse magnetic field contacts throughout the arcing period. In particular, for flat contacts with externally applied transverse magnetic field under a current of 8 kA, the peak oscillation amplitude of arc voltage reaches up to 250 V.

Key words: magnetic field methods; vacuum arc; DC interruption; arc voltage characteristics

收稿日期:2026-03-21; 修回日期:2026-05-21

基金项目:智能电网重大专项(2030)资助(2024ZD0802500)。

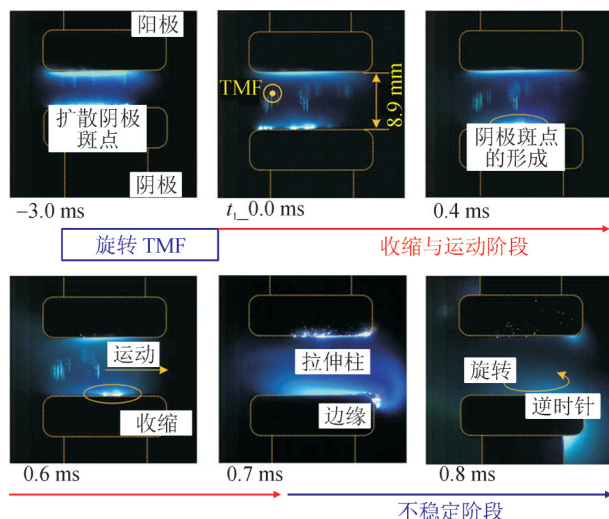
Project Supported by Smart Grid-national Science and Technology Major Project Under Grant(2030)(2024ZD0802500).

0 引言

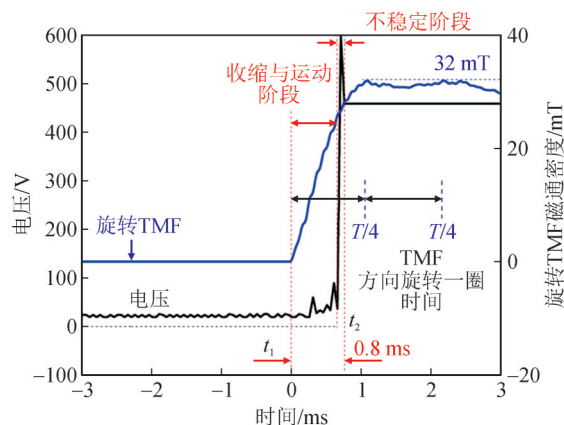
低压直流配电系统凭借其输送电能功率密度高、线路损耗小、系统稳定性好等优点,在电力推进、电动汽车、可再生能源及其构成的直流微电网、分布式电网等场合扮演了极其重要的角色,并受到越来越广泛的应用^[1]。在“双碳”等战略目标的驱动下,中国重点发展风能、太阳能等可再生能源^[2-4]。直流电力系统也随着时间逐步发展,并对直流开断技术提出了更高的要求^[5]。低压直流断路器是直流电力系统安全运行与保护的核心设备,可切断短路电流遏制故障蔓延,保证系统安全稳定运行^[6-7]。

真空开关具有优异的故障开断性能、简单的运维条件、绿色环保的应用优势和较长的使用寿命,是直流断路器相关领域的核心研究课题。真空电弧的本质为金属蒸汽,在无外界扰动的运行工况下呈现正向伏安特性。真空开断过程中施加可控磁场可以调控电弧的运动和燃烧,从而大幅提升真空灭弧装置的故障开断性能。现阶段工程领域普及应用的磁场调控电弧技术主要包含横向磁场和纵向磁场两类^[8-12]。横向磁场技术是通过特殊触头结构或者外置辅助设备,在电弧燃烧过程中形成与电弧电流方向垂直的磁场。在横向磁场的作用下,洛伦兹力驱动真空电弧在触头间隙旋转运动,有效抑制了真空电弧对于触头局部的过度烧蚀和阳极斑点的生成^[13-16]。旋转横向磁场作用下真空电弧的演化特性见图1^[17]。纵向磁场技术是通过特殊触头结构或者外置辅助设备,在电弧燃烧过程中形成与电弧电流方向垂直的磁场。在纵向磁场的作用下,真空电弧扩散、均匀分布在触头表面,燃弧稳定,烧蚀少^[18-20]。目前,国内外研究对不同磁场方式下真空开关电弧电压特性及其直流开断性能的研究还存在不足,需要进一步的深入探讨。

文中的目标是研究不同磁场方式下真空开关电弧电压特性及其直流开断性能。文中实验中,用于直流开断及燃弧实验的触头共有5种,分别为平板触头、脉振横向磁场作用下的平板触头、径向横磁触头、螺旋槽触头、纵磁触头。文中将通过直流开断试验研究不同磁场方式作用下的直流真空电弧开断的电弧电流电压变化规律,获得了其最大直流开断能力。文中将通过大电流燃弧实验研究了同磁场方式作用下的真空电弧的电弧电压变化规律并进行对比。



(a) 真空电弧的演化特性



(b) 对应的波形

图1 旋转TMF下直流真空电弧的物理过程

Fig. 1 Physical process of the DC vacuum arc in the presence of a rotating TMF

1 实验设置

1.1 触头磁场简介

文中实验中,用于产生真空电弧的触头共有5种。本次实验中所采用的平板结构触头见图2,无磁场,触头材料为CuCr50,触头直径为19 mm。

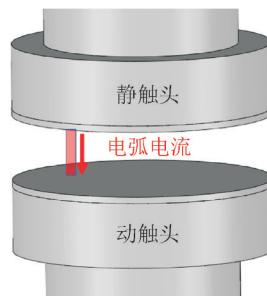
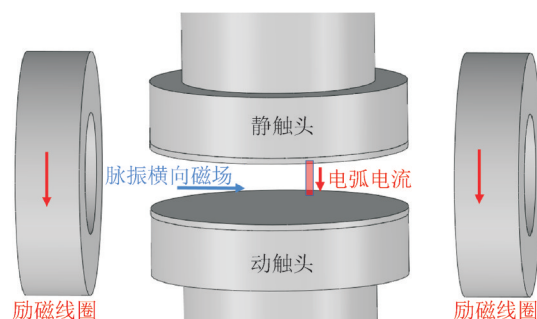


图2 平板触头结构图

Fig. 2 The structure of flat contact

文中的脉振横向磁场作用下的平板触头结构见图3(a)。在平板结构的真空灭弧室基础上添加了

脉振横向磁场。两个线圈的中心与灭弧室达到预定开距时的触头间隙中心保持同一水平线,在灭弧室触头分闸过程中,利用图3(b)所示的励磁回路,使励磁线圈在触头间隙产生均匀的横向磁场,磁场强度峰值约为150 mT。



(a) 结构示意图

(b) 脉振横向磁场励磁回路电路拓扑图

图3 脉振横向磁场作用下的平板触头示意图

Fig. 3 The structure of plate contact under pulsating transverse magnetic field

文中所采用的径向磁场触头结构见图4,由于两组相同的永磁体分别置于横磁触头的对称两端以及触头本身的杯状横磁结构,在触头间隙会形成围绕中轴线向外发散的径向横磁,驱动电弧沿触头表面运动,减小触头烧蚀,增大电弧电压。触头材料为CuCr50,环形触头外径为60 mm。

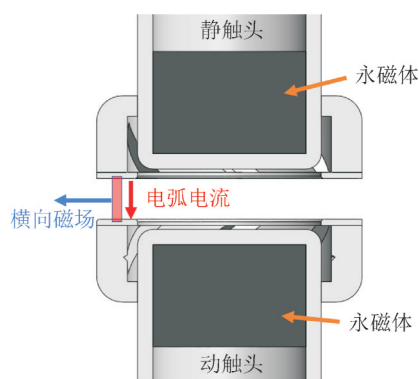


图4 径向横磁触头的结构图

Fig. 4 The structure of radial transverse magnetic contact

文中所采用的螺旋槽触头结构见图5。螺旋槽触头在真空灭弧室分断电流时产生横向磁场,从而限制触头表面阳极斑点的形成,提高灭弧室的分断能力。文中所使用的纵磁触头结构见图6,电流流过杯状纵磁结构触头,在触头间隙形成强大的纵向

磁场。触头材料为CuCr50,触头直径为58 mm。

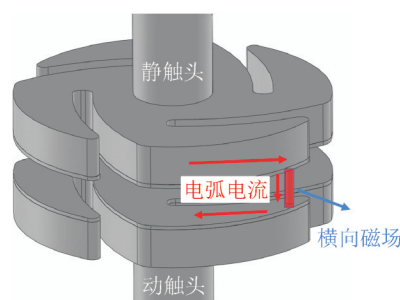


图5 螺旋槽触头的结构图

Fig. 5 The structure of spiral groove contact

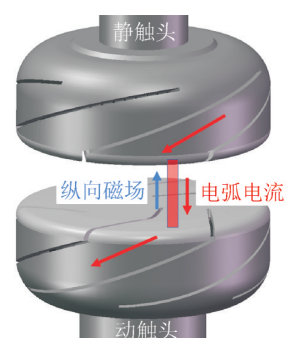


图6 杯状纵磁触头的结构图

Fig. 6 The structure of cup-shaped longitudinal magnetic contact

1.2 实验平台设计

不同磁场方式下真空电弧开断实验主回路及研究平台的设计示意图见图7。实验主回路中电容器组的电容 $C_0=100$ mF,最高可充电至1.5 kV。回路中电抗器 $L_0=0.101$ mH。实验平台采用LCR回路作为直流电源,进行直流开断实验。直流开断实验中电阻取值为 $R_0=1$ Ω 。操动机构在燃弧阶段的平均分闸速度为3 m/s,触头开距固定为12 mm,机构运动曲线即分闸曲线都由位移传感器测量。电流测量采用霍尔传感器,电压测量采用高压探头。实验前,电容 C_0 充电至预定电压。在实验中,晶闸管SW首先导通,电容 C_0 开始放电,其后真空灭弧室开始分闸。避雷器MOV并联在灭弧室两端。

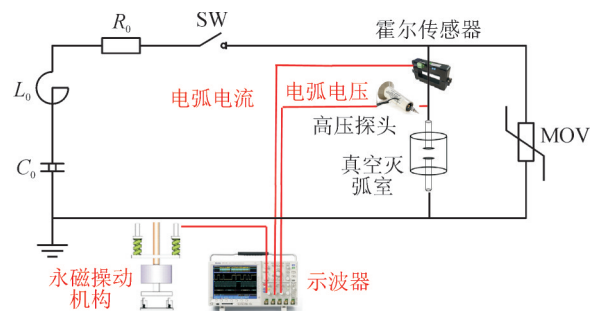


图7 实验平台设计示意图

Fig. 7 The experimental circuit topology diagram

2 实验结果

2.1 不同磁场方式下真空电弧直流开断实验结果

本节研究了不同磁场方式下真空直流电弧开断的电弧电压、电弧电流的变化规律。对选取的5种不同磁场方式触头进行电流逐渐增大的直流开断实验。

在低压直流开断实验中,平板触头的开断能力为DC 375 V/375 A左右。其开断DC 375 V/375 A的具体波形图像见图8。由图8可得开断过程主要分为两个阶段:第一阶段, $t_1 \sim t_2$,电弧电压基本不变,该阶段持续时间较长。第二阶段, $t_2 \sim t_3$,该阶段时间短,电弧电压快速上升。随后电流过零开断。

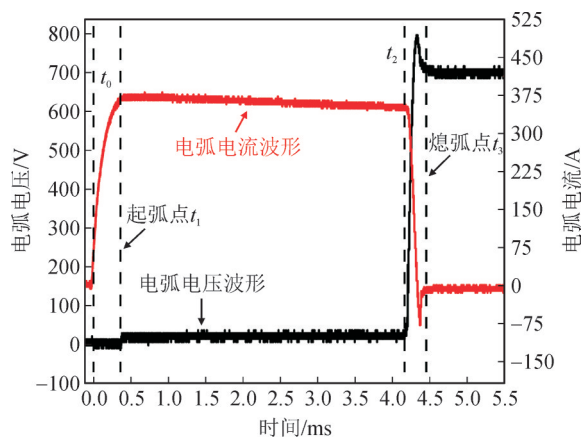


图8 平板触头开断DC 375 V/375 A电压电流波形图

Fig. 8 Voltage and current waveforms of flat contact interruption under DC 375 V/375 A

在脉振横向磁场频率为160 Hz,磁场强度峰值为150 mT的情况下,平板触头的最大开断能力在DC 900 V/900 A左右。其开断DC 900 V/900 A的具体波形图像见图9。由图9可得开断过程与无脉振横磁的情况近似,主要分为两个阶段:第一阶段, $t_1 \sim t_2$,电弧电压基本不变,该阶段持续时间较长。与未添加横磁的情况相比,此阶段明显缩短。第二阶段, $t_2 \sim t_3$,该阶段时间短,在该阶段内,电弧电压出现了明显的振荡,电弧电压快速上升。随后电流过零开断。与平板触头相比,脉振横向磁场作用下的触头的开断能力得到了极大的提升。同等开断条件下,在稳定阶段(图9中 $t_1 \sim t_2$),脉振横向磁场作用下的平板触头的稳定阶段持续时间明显缩短。在开断阶段(图9中 $t_2 \sim t_3$),脉振横向磁场作用下的平板触头的开断阶段持续时间明显缩短,而且电弧电压呈现出明显的振荡波形特点。外施横向磁场条件下,电弧被洛伦兹力推向触头边缘并快速拉长,直流开断能力最强。

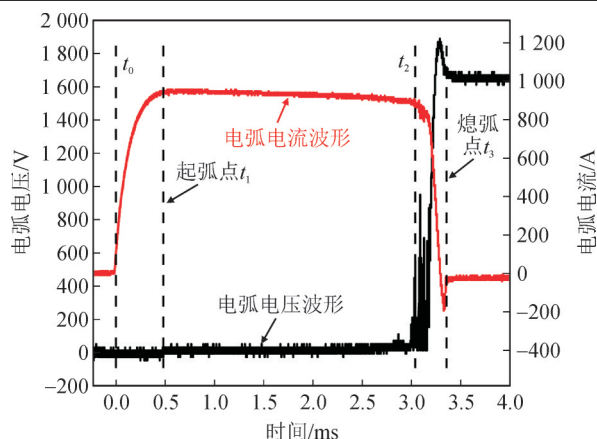


图9 脉振横向磁场作用下平板触头开断DC 900 V/900 A电压电流波形图

Fig. 9 Voltage and current waveforms of flat contact interruption under pulsating transverse magnetic field at DC 900 V/900 A

径向横磁触头的最大开断能力在DC 650 V/650 A左右。其开断DC 650 V/650 A的具体波形图像见图10。由图10可得开断过程主要分为两个阶段:第一阶段, $t_1 \sim t_2$,电弧电压基本不变,该阶段持续时间较长。第二阶段, $t_2 \sim t_3$,该阶段持续时间短,电弧电压出现明显的振荡,且振荡情况较横磁作用下的平板触头更加明显,电弧电压快速上升。随后电流过零开断。横向磁场触头条件下,触头结构产生横向磁场,驱动电弧沿触头表面运动,减小了触头烧蚀,增大了电弧电压,直流开断能力强。

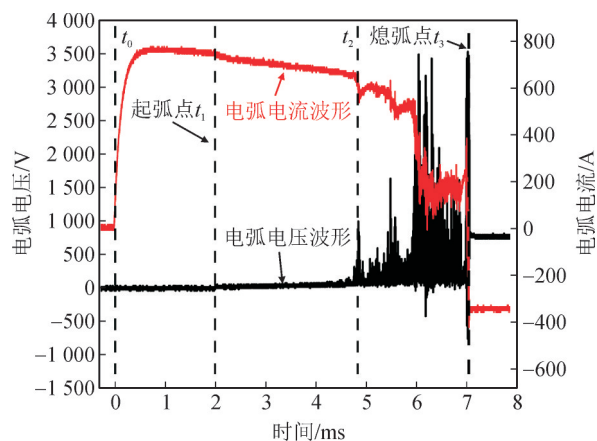


图10 径向横磁触头开断DC 650 V/650 A电压电流波形图

Fig. 10 Voltage and current waveforms of radial transverse magnetic contact interruption at DC 650 V/650 A

螺旋槽触头未成功开断50 V/50 A。其开断DC 50 V/50 A失败的具体波形图像见图11。由图11可得开断过程主要分为两个阶段:第一阶段, $t_1 \sim t_2$,电弧电压基本不变。第二阶段, t_2 之后,电压有所升高后一直处于稳定的状态;电弧电流有所降低,但一直未被开断。

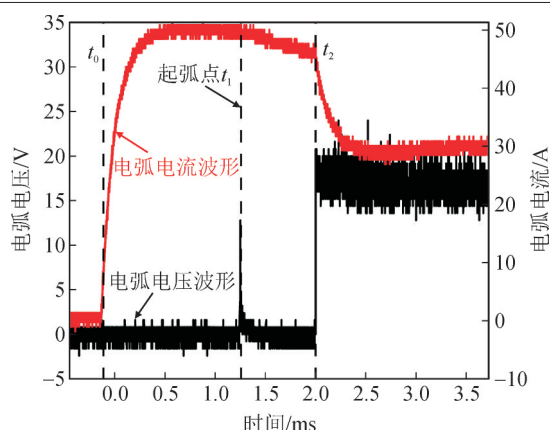


图11 螺旋槽触头开断DC 50 V/50 A电压电流波形图
Fig. 11 Voltage and current waveforms of spiral groove contact interruption at DC 50 V/50 A

纵磁触头开断DC 100 V/100 A失败的具体波形图像见图12。由图12可得其开断过程与螺旋槽触头近似,主要分为两个阶段:第一阶段, $t_1 \sim t_2$,电弧电压基本不变。第二阶段, t_2 之后,电压一直处于稳定的状态,电弧电流一直未被开断。纵向磁场触头条件下,真空电弧扩散、均匀分布在触头表面,燃弧稳定,烧蚀少,直流开断能力几乎没有。

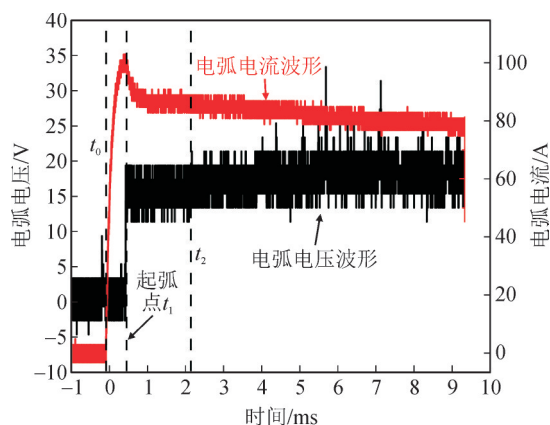


图12 纵磁触头开断DC 100 V/100 A电压电流波形图
Fig. 12 Voltage and current waveforms of axial magnetic contact interruption at DC 100 V/100 A

不同磁场方式下直流开断时间变化规律见图13,脉振横向磁场作用下的平板触头直流开断能力最强,最大可开断DC 900 V/900 A。在开断DC 400 V/400 A时,脉振横向磁场作用下的平板触头成功直流开断所用时间约为2 ms,为其他情况的一半。而纵磁触头与螺旋槽触头的直流开断能力则很弱,开断能力不超过50 V/50 A,电流一直处于稳定的状态,无法开断直流电流。

2.2 不同磁场方式下真空电弧大电流燃弧实验波形分析

本节研究了不同磁场方式作用下真空电弧大电流燃弧实验中电弧电压、电弧电流的变化规律。

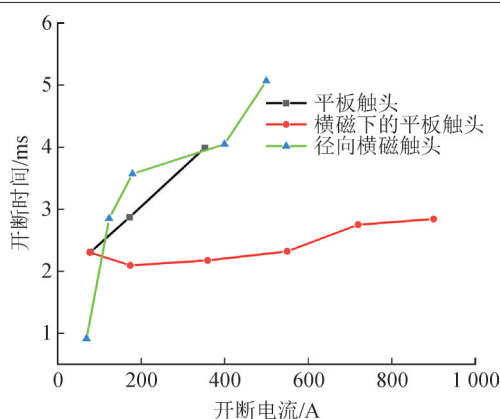


图13 不同磁场方式下直流开断时间变化规律
Fig. 13 Variation law of dc interruption time under different magnetic field modes

对选取的5种不同磁场结构触头进行电流逐渐增大的大电流燃弧实验。

平板触头在峰值电流8 kA条件下燃弧过程的电压电流波形见图14。由图14可得燃弧过程主要分为3个阶段:第一阶段, $t_1 \sim t_2$,电弧电压建立,然后缓慢上升,该阶段持续时间较长。第二阶段, $t_2 \sim t_3$,电弧电压出现明显的震荡,电弧电压在该阶段达到了峰值。第三阶段:电弧电压随着电弧电流的减小而缓慢减小,直至电弧电流归零,电弧电压也消失。

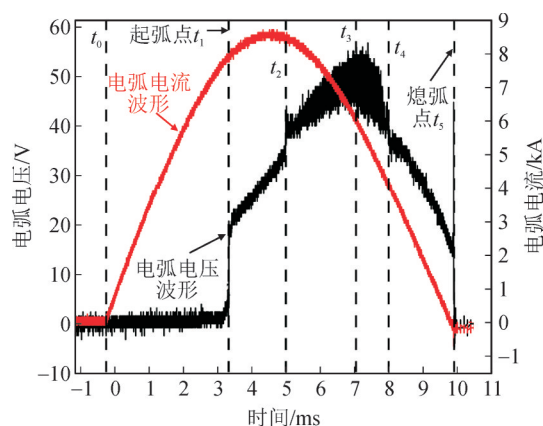


图14 平板触头峰值电流8 kA下的燃弧电压电流波形图
Fig. 14 Voltage and current waveforms during arcing of flat contact at peak current of 8 kA

脉振横磁作用下的平板触头在峰值电流为8 kA的条件下的燃弧过程的电压电流波形见图15。由图15可得燃弧过程主要分为两个阶段:第一阶段, $t_1 \sim t_2$,电弧电压建立,然后缓慢上升。第二阶段, $t_2 \sim t_3$,电弧电压出现明显的震荡,在该阶段内,电弧电压出现了两个峰值,直至电弧电流归零,电弧电压也消失。

径向横磁触头在峰值电流为10 kA的条件下的燃弧过程的电压电流波形见图16。由图16可得: $t_1 \sim t_2$,电弧电压建立,然后缓慢上升。 $t_2 \sim t_3$,电弧电压

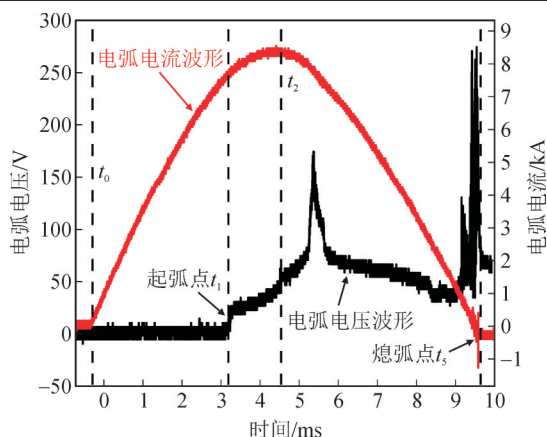


图15 脉振横磁作用下平板触头峰值电流8 kA下的燃弧电压电流波形图

Fig. 15 Voltage and current waveforms during arcing of flat contact under pulsating transverse magnetic field at peak current of 8 kA

出现震荡。 $t_3 \sim t_4$, 电弧电压逐渐上升。 $t_4 \sim t_5$, 电弧电压发生剧烈的振动直至电弧电流归零, 电弧电压也消失。

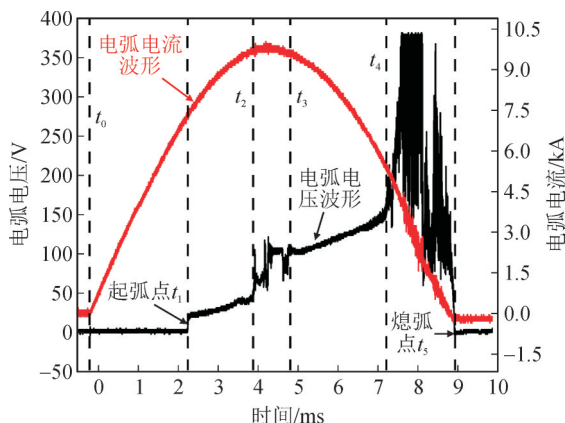


图16 径向横磁触头峰值电流10 kA下的燃弧电压电流波形图

Fig. 16 Voltage and current waveforms during arcing of radial transverse magnetic contact at peak current of 10 kA

螺旋槽触头在峰值电流为10 kA的条件下的燃弧过程的电压电流波形见图17。由图17可得燃弧过程主要分为3个阶段: 第一阶段, $t_1 \sim t_2$, 电弧电压建立, 然后缓慢上升。第二阶段, $t_2 \sim t_4$, 电弧电压出现明显的震荡, 电弧电压在时间 t_3 达到了峰值。第三阶段, $t_4 \sim t_5$, 电弧电压随着电弧电流的减小而缓慢减小, 直至电弧电流归零, 电弧电压也消失。

纵磁触头在峰值电流为8 kA的条件下的燃弧过程的电压电流波形见图18。由图18可得燃弧过程中电弧电压始终比较低, 随着电流增加电压有缓慢增加, 最高未超过30 V。其后, 电弧电压随着电弧电流的减小而减小, 直到电弧电流归零后, 电弧电压也消失。

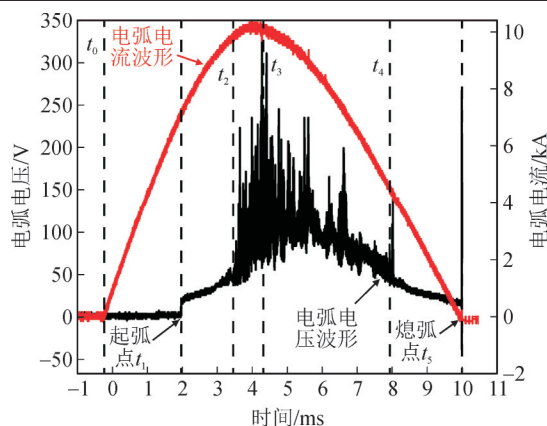


图17 螺旋槽触头峰值电流10 kA下的燃弧电压电流波形图

Fig. 17 Voltage and current waveforms during arcing of spiral groove contact at peak current of 10 kA

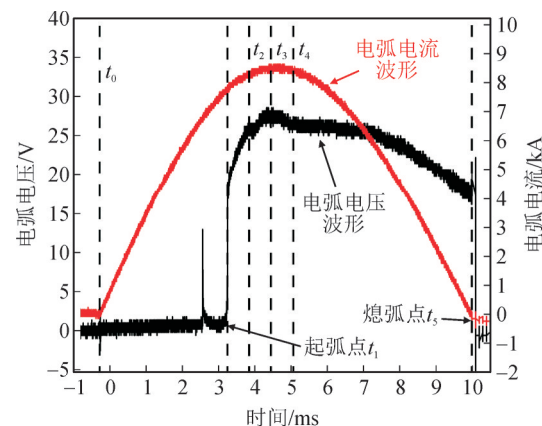


图18 纵磁触头8 kA燃弧电压电流波形图

Fig. 18 Voltage and current waveforms during arcing of axial magnetic contact at 8 kA

对比研究了不同磁场方式下8 kA燃弧实验中真空电弧电压随时间变化特征见图19。如图19所示, 在纵磁触头条件下, 真空电弧在整个燃弧过程中, 其电弧电压波形整体平稳。电弧电压在起弧阶段快速上升达到30 V左右, 之后一直处于较低的水平。在螺旋槽触头条件下, 真空电弧电压在起弧阶段快速上升达到50 V以上, 经过1 ms之后, 电弧电压波形出现显著的噪声, 其持续时间达到4 ms左右, 噪声峰值电压达到100 V以上。在平板触头条件下, 真空电弧电压在起弧阶段快速上升达到30 V以上, 在电流峰值阶段, 电弧电压波形出现短时噪声峰值电压达到70 V以上。在径向横磁触头条件下, 电弧电压在起弧之后整体缓慢上升, 最后在电流峰值之后达到200 V以上, 并且伴随一定的电压噪声。在横磁作用下的平板触头条件下, 电弧电压在起弧阶段出现一个超过150 V的峰值, 并在电流峰值之后达到250 V以上, 并且电压噪声明显。

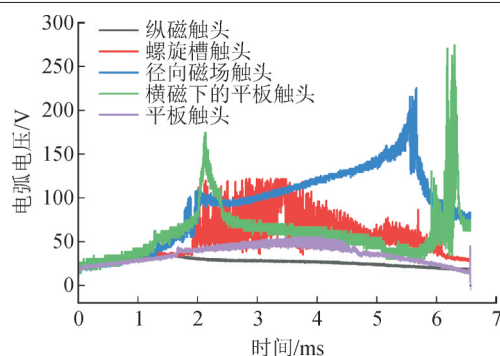


图 19 不同磁场方式下 8 kA 燃弧实验电弧电压特性

Fig. 19 Arc voltage characteristics in 8 kA arcing test under different magnetic field modes

3 讨论

图 8-12 对比研究了不同磁场方式下真空电弧直流开断特性, 图 19 对比研究了不同磁场方式下 8 kA 燃弧实验中真空电弧电压随时间变化特征。综合前期直流真空电弧的燃弧特性实验研究, 真空开关在直流开断中主要是基于磁场作用下不稳定的真空电弧产生的高电弧电压实现对于直流电流的限流和开断。因此, 真空电弧的不稳定状态是电弧电压提升以及直流开断能力的关键。纵磁触头和螺旋槽触头条件下, 真空电弧受到触头磁场的影响, 电弧等离子主要集中在触头间隙, 也不利于电弧的拉伸和形变, 因此电弧电压较低, 直流开断能力弱。而在径向横磁触头和横磁作用下的平板触头条件下, 真空电弧的弧柱处于触头边缘, 电弧收到横向磁场的作用发生拉伸和形变, 电弧稳定性差。特别是横磁作用下的平板触头条件下, 其电弧弧柱被外施横向磁场反复拉伸作用, 最终在触头边缘位置发生显著形变, 阴极斑点也从触头边缘跌落, 因此电弧电压较高, 直流开断能力更强。

4 结论

文中研究了不同磁场方式作用下真空电弧电压特性及其直流开断性能。文中得到了以下结论:

1) 文中通过实验获得了不同磁场方式下真空直流电弧开断的能力强弱。在文中实验条件下, 脉振横向磁场作用下的平板触头直流开断能力最强, 最大可开断 DC 900 V/900 A, 而纵磁触头与螺旋槽触头的直流开断能力则很弱, 开断能力不超过 50 V/50 A。

2) 通过对试验结果分析可得, 在文中实验条件下, 开断 DC 400 V/400 A 时, 脉振横向磁场作用下的平板触头成功直流开断所用时间约为 2 ms, 为其他

情况的一半。而纵磁触头与螺旋槽触头情况下, 电流一直处于稳定的状态, 无法开断直流电流。

3) 实验结果表明横磁类型触头的电弧电压均在燃弧过程中发生了剧烈振荡。在文中实验条件下, 外施横磁平板触头情况下的振荡幅值最高可达 250 V 左右, 而平板触头以及纵磁触头的电弧电压一直处于一个稳定且较低的水平, 均在 50 V 以下。

参考文献:

- [1] 王 璐. “十五五”迎关键期新型电力系统建设加速攻坚[N]. 经济参考报, 2025-09-30(003).
Wang Lu. Accelerated construction of new - type power system during the critical period of the 15th five-year plan[N]. Economic Reference News, 2025-09-30(003).
- [2] 朱继忠, 高美云, 肖鹏飞, 等. 大规模海上风电并网与运行技术综述[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5): 2-24.
Zhu Jizhong, Gao Meiyun, Xiao Pengfei, et al. Review of grid integration and operation technologies for large - scale offshore wind power[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5): 2-24.
- [3] 黄永瑞, 韩 坤, 胡秋玲, 等. 基于可控消能的直流系统故障下送端交流过电压抑制[J]. 电力工程技术, 2025, 44(4): 138-146.
Huang Yongrui, Han Kun, Hu Qiuling, et al. Suppression of AC overvoltage at sending end under DC transmission system fault based on controllable energy dissipation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(4): 138-146.
- [4] 曹勋哲, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 基于电池储能的陆上风电全直流系统低电压穿越策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(3): 150-159.
Cao Xunzhe, Li Fengting, Yin Chunya, et al. Low voltage crossing strategy for all-DC power generation system of onshore wind power based on battery energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(3): 150-159.
- [5] 黄 强, 李 宽, 范荣奇, 等. 新能源直流送出系统受端交流故障穿越控制策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 165-173.
Huang Qiang, Li Kuan, Fan Rongqi, et al. A grid side fault ride-through control for renewable energy connected MMC-HVDC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 165-173.
- [6] 江道灼, 郑 欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.
Jiang Daozhuo, Zheng Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [7] 方朝林, 许志红. 基于混合换流技术的交直流接触器无弧控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2468-2476.
Fang Chaolin, Xu Zhihong. No - arc control strategy of AC/DC contactor based on hybrid commutation technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2468-2476.
- [8] Slade P G. The vacuum interrupter: theory, design, and application [M]. Boca Raton: CRC Press, 2008: 293-296.
- [9] Liu Zhiyuan, Wang Jimei, Xiu Shixin, et al. Development of high-voltage vacuum circuit breakers in China[J]. IEEE Transactions on

(下转第 59 页)

2017, 53(3):223-229.

Gao Feng, Ren Li, Zhang Bojian, et al. Optimal design of storage capacitor of electromagnetic repulsion mechanism in 40.5 kV vacuum circuit breaker based on orthogonal test design[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3):223-229.

- [23] 张 宇, 毕 凡, 苏海博, 等. 基于最大奇异值能量熵和随机森林的真空快速开关机械故障诊断[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 184-192.

Zhang Yu, Bi Fan, Su Haibo, et al. Mechanical fault diagnosis of vacuum fast switch based on energy entropy of maximum singular value and random forest algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 184-192.

- [24] 赵双乐, 刘志峰, 侯晓鑫, 等. 逆变器启动工况下光伏直流串联电弧故障识别方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(10):4691-4702.

Zhao Shuang, Liu Zhifeng, Hou Xiaoxin, et al. Diagnosis of photovoltaic DC series arc fault under inverter startup conditions [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10):4691-4702.

- [25] 张芷寒, 高 亮, 郭志鹏, 等. 基于熵权法的CA砂浆脱空位置对单元式无砟轨道动力状态影响评价研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(1):125-135.

Zhang Zhihan, Gao Liang, Guo Zhipeng, et al. Evaluation of

impact of CA mortar void position on dynamic state of unit ballastless track based on entropy weight method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(1): 125-135.

- [26] 范伟军, 翟俭超, 李 君, 等. 电动助力器传动故障在线振动检测系统的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020(3):78-83.

Fan Weijun, Zhai Jianchao, Li Jun, et al. Design of on-line vibration detection system for transmission faults in electric booster [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(3):78-83.

- [27] 朱哲晓, 袁 召, 陈立学, 等. 电磁斥力机构结构应力分析与优化设计[J]. 高电压技术, 2020, 46(8):2692-2699.

Zhu Zhexiao, Yuan Zhao, Chen Lixue, et al. Structural stress analysis and optimization design of electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2692 - 2699.

- [28] Guan Chen, Yao Xiaofei, Ding Jiangang, et al. Study on dynamic characteristics of a repulsion mechanism in superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8):1-5.

莫永鹏(1989—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为电力开关设备状态评估方向(通信作者)(E-mail: yongpeng.mo@xjtu.edu.cn)。

(上接第 49 页)

Plasma Science, 2007, 35(4):856-865.

- [10] 贾申利, 史宗谦, 王立军. 真空断路器用于直流开断研究综述[J]. 高压电器, 2017, 53(3):12-16.

Jia Shenli, Shi Zongqian, Wang Lijun. Review on DC interruption research of vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3):12-16.

- [11] 刘晓明, 赵媛媛, 陈 海, 等. 直流横磁真空灭弧室电弧运动特性影响因素分析[J]. 真空科学与技术学报, 2025, 45(3):197-204.

Liu Xiaoming, Zhao Yuanyuan, Chen Hai, et al. Analysis of influencing factors of arc motion characteristics of DC transverse magnetic vacuum interrupter[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2025, 45(3):197-204.

- [12] 刘 珊, 袁 召, 刘黎明, 等. 真空拉弧起始收缩过程实验研究[J]. 高压电器, 2023, 59(6):33-39.

Liu Shan, Yuan Zhao, Liu Liming, et al. Experimental study on the initial contraction process of vacuum arc drawing[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6):33-39.

- [13] Niwa Y, Palad R, Sasage K, et al. Vacuum arc behavior in transversal magnetic field electrode of vacuum interrupter[C]//2012 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), 2012:505-508.

- [14] Wolf C, Kurrat M, Lindmayer M, et al. Arcing behavior on different TMF contacts at high-current interrupting operations[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(6):1284-1290.

- [15] Hanashiro S, Nikadori Y, Kaneko E. Investigation on small DC

vacuum arc characteristic under transverse magnetic field[C]//2016 International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST), 2016:138-141.

- [16] Emtage P R, Kimblin C W, Gorman J G, et al. Interaction between vacuum arcs and transverse magnetic fields with application to current limitation[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1980, 8(4):314-319.

- [17] Ma H, Wang J, Liu S, et al. Vacuum arc transient behaviors and voltage characteristics in low-current DC interruption under rotating TMF[J]. AIP Advances, 2020, 10(8):085018.

- [18] Schulman M B, Schellekens H. Visualization and characterization of high-current diffuse vacuum arcs on axial magnetic field contacts [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(2):443-451.

- [19] Schulman M B, Bindas J A. Evaluation of AC axial magnetic fields needed to prevent anode spots in vacuum arcs between opening contacts[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A, 1994, 17(1):53-57.

- [20] Watanabe K, Kaneko E, Yanabu S. Technological progress of axial magnetic field vacuum interrupters[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(4):609-616.

李 强(1983—), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要研究方向为高压电器产品及技术(通信作者)(E-mail: hisnelee@163.com)。

刘 伟(1980—), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究方向为高压电器产品及技术(E-mail: huzi13145@163.com)。