

微米级金刚石颗粒开断 400V 直流电弧的可行性探讨

程 显^{1,2}, 王华清^{1,2}, 葛国伟^{1,2}, 杨培远¹, 陈占清²

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 河南省输配电装备与电气绝缘工程技术研究中心, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了探究固态流体颗粒新型灭弧方式在 400V 低压直流微网领域的应用可行性,进而提供新型灭弧方式的低压直流断路器设计思路,本文选用微米级金刚石颗粒作为低压直流断路器的灭弧介质,设计了 2kV/3.5kA、电流上升率 1.3kA/ms 的直流合成回路,以及与之配套的灭弧室测试其灭弧性能。在预加电压为 800V、短路电流峰值 1~2kA 条件下进行金刚石颗粒的熔丝熔断灭弧试验与操纵机构拉弧试验,分析微米级金刚石颗粒对 400V 直流短路电弧开断性能的影响。试验结果表明:使用平均直径为 50 μ m 的金刚石颗粒作为灭弧介质,能够有效提高燃弧电压,其燃弧电压提升幅度约为空气作为灭弧介质时的 5~6 倍。且采用机械力推动金刚石颗粒冲击电弧或在灭弧室内充入 CO₂ 气体等方法,均可有效提升其灭弧速度。最后讨论了微米级金刚石颗粒在用作低压直流断路器灭弧介质的可行性和提升类似固态流体颗粒灭弧性能的改进措施。

关键词: 微米级金刚石颗粒; 断路器; 低压直流断路器; 直流开断

DOI: 10.12067/ATEEE1802031 **文章编号:** 1003-3076(2019)04-0089-08 **中图分类号:** TM762.2

1 引言

随着直流微网系统和智能电网发展,低压直流输电成为当今的研究热点和发展趋势,而与之配套的直流断路器作为保护器件,承担着保障电网稳定工作的重要任务^[1,2]。目前直流微网的主要电压等级为 400V、10kV、35kV,其中 400V 的低压微网广泛应用于太阳能发电和风力发电等分布式发电领域,是国内外研究的热点^[3-5]。

微网用低压直流断路器以塑壳空气断路器为主^[6],采用机械拉弧加灭弧栅片的灭弧方式,利用拉弧时产生的磁场将电弧拉入灭弧栅片并进行分割,加速电弧冷却熄灭^[7]。这种结构的断路器开断性能较好,但存在着开断大电流时灭弧栅片烧蚀严重,且燃弧时间较长的缺点^[8]。其余种类的断路器,例如真空断路器、全固态断路器和混合式断路器等,受限于成本较高、配合及控制系统相对复杂等原因暂时无法大规模应用于低压直流微网中^[9,10]。

直流电弧燃烧时同时存在着游离与去游离两种过程,当这两种过程处于平衡时,电弧就会处于稳定燃烧状态,如果去游离的速度强于游离的速度,则电弧就会熄灭^[11,12]。能够加快去游离速度的方法主要有:①拉长电弧;②加速电弧冷却;③灭弧介质为气体时,增加气体压力;④使电弧接触固体表面,促进带电质点复合^[13]等。常用的灭弧介质,如 SF₆、油、真空等,都可以吸收电弧能量加速电弧冷却,通过吹弧、加压等方法,也能实现拉长电弧等方式,加快去游离过程,从而加速电弧熄灭。

微米及以下直径的固态颗粒物质既可以呈现固态物质的性质,同时兼有液体物质的流动性,因此也被称为固态流体颗粒。适当选择相应固态流体颗粒材料,既能够通过让电弧充分接触固体材料,也能吸收电弧能量,在一定的冲击力作用下也可以分割拉长电弧,因此这种颗粒物质能够加快去游离速度,可能是一种潜在的断路器灭弧介质^[14]。

在此基础上,设计了以金刚石颗粒作为灭弧介

收稿日期: 2018-02-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(51407163)、中国博士后科学基金面上资助项目(2017M622370)、国家轨道交通电气化与自动化工程技术研究中心开放课题(NEEC-2017-B07)、河南省高校重点科研项目(16A470014)
作者简介: 程 显(1982-),男,河南籍,副教授,博士,研究方向为输配电装备与绝缘技术;
王华清(1994-),男,河南籍,硕士研究生,研究方向为输配电装备与绝缘技术。

质的灭弧室结构,搭建了相应的合成回路,通过熔丝熔断试验与拉弧试验,探究了金刚石颗粒对 400V 低压直流电弧的开断性能影响,通过对比金刚石颗粒与常压空气和 CO₂ 气体的电弧开断波形,分析并讨论使用颗粒物质作为低压直流断路器的灭弧介质的可行性。

2 金刚石颗粒灭弧试验设计

2.1 金刚石颗粒的基本性质

石英砂颗粒绝缘强度符合要求,但熔点较低,且高温时容易出现板结^[15],所以不能直接应用在断路器中。综合考虑导热性、熔沸点和高温板结程度等条件后,金刚石颗粒在各类材料中相对适于进行低压直流环境下开断电弧试验。

金刚石的主要成分为碳,微观结构为等轴晶系四面或六面体立方体。金刚石的熔点约为 3550~4000℃,沸点为 4827℃,热导率高,一般为 2000W/(m·k)^[16]。本文选用的是常见的黄绿色金刚石颗粒,平均直径为 50μm。这种颗粒具有较好的流动性,对断路器触头的动作影响较小。选用的金刚石颗粒如图 1 所示。

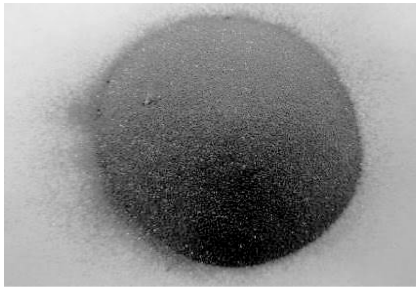


图 1 金刚石颗粒
Fig. 1 Picture of diamonds

空气环境下,将金刚石颗粒均匀铺在两个平板电极间,测得不同厚度金刚石颗粒击穿电压见表 1。

表 1 平铺状态下的不同厚度金刚石颗粒击穿电压

Tab. 1 Breaking voltage of different thickness of diamonds

参数	数值						
金刚石颗粒厚度/mm	2	3	4	5	10	15	20
击穿电压/kV	4	5.1	6.3	9.3	13.2	16.1	18.6

根据 GB14048-1 断路器标准,额定电压为 300~690V 的低压直流断路器,需耐受交流试验电压 1890V,直流电压 2670V;额定冲击电压规定为 8kV 时,需耐受最高 9.8kV 冲击电压,而间隙长度 10mm 的 50μm 级金刚石颗粒的绝缘强度符合 400V 电压

等级条件下的微网低压直流断路器的耐压标准。

2.2 试验方案设计

考虑固态流体颗粒灭弧理论探究与断路器的实际应用,选择了熔丝埋入金刚石颗粒的熔断试验和触头间填充金刚石颗粒的拉弧试验两种试验方式。

熔断试验选用 0.6mm 直径铅锡合金保险丝,水平埋入熔丝盒内,尽量保证其处于伸直状态,四周金刚石覆盖厚度均为 20mm。通过接线端子接入回路中,在两端通入较大短路电流,产生电弧,并施加一定恢复电压测试其介质恢复能力。熔丝试验不同变量条件为熔丝长度(10mm 与 20mm)、电压源预加电压(800V,700V,600V)以及金刚石体系的受力状态(通过施加压力控制),测试这三个条件对金刚石灭弧性能的影响。

常见的低压灭弧介质为空气,同时 CO₂ 气体具有一定的绝缘能力和灭弧能力^[17,18],在低压条件下使用较为经济合理,因此选择空气和 CO₂ 气体作为灭弧介质作为对照样本进行对比试验。

静态金刚石颗粒的灭弧特性可由熔丝试验得到,而动态金刚石颗粒吸收电弧能量和分割电弧的性能主要由拉弧试验确定,而金刚石颗粒的运动速度、运动方向和运动环境等因素都有可能对灭弧性能有一定影响,因此拉弧试验包括直接使用金刚石颗粒的直接拉弧试验,以及使用机械力推动金刚石冲击电弧试验,和 CO₂ 气体环境下的机械力推动金刚石颗粒灭弧试验,分别测试金刚石颗粒在无冲击力作用下、有冲击力作用下及在绝缘气体环境中受冲击力作用下的灭弧性能。因为使用的金刚石颗粒材料特殊,无法使用标准触头与标准灭弧室进行试验,因此需要可拆卸灭弧室与能够带动金刚石颗粒的特殊触头,并采用对照试验增加试验结果的准确性。

2.3 试验回路搭建

试验回路包括一个低压电流源和一个低压电压源^[19],在电流回路中加入二极管防止电压源电容对电流源电容反充电。该回路电压源侧最高电压为 2kV,最大短路电流为 3.5kA,短路电流上升率为 1.3kA/ms。试验电路图及实物图如图 2 所示。因为金刚石颗粒的灭弧时刻不确定,为使长时间燃弧后电压回路还有足够电压加载在试品 FT 上,需要脉冲电路控制晶闸管同时触发,利用电流回路大电流使试品快速起弧,电压回路电压衰减率低的特性,保证电压源的准确施加。经测试,试验电路电压源电压能够准确施加在试品上,符合试验要求。

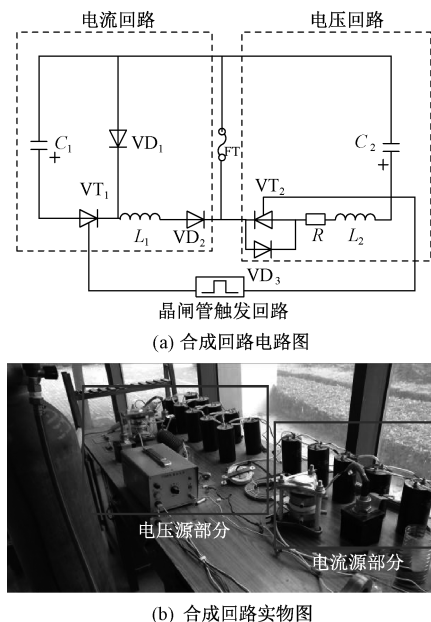


图 2 试验合成回路图

Fig. 2 Physical picture and diagram of synthetic circuit

5mF 电容 C_2 作为电压源,提供低压电压,电流源 C_1 采用 60mF 电容,提供低频电流。电路中其余主要参数为: L_1 为 $53\mu\text{H}$, R 为 10Ω , L_2 为 $10\mu\text{H}$ 。晶闸管 VT_1 、 VT_2 控制对试验样品施加的电压和电流。

3 熔丝熔断试验及分析

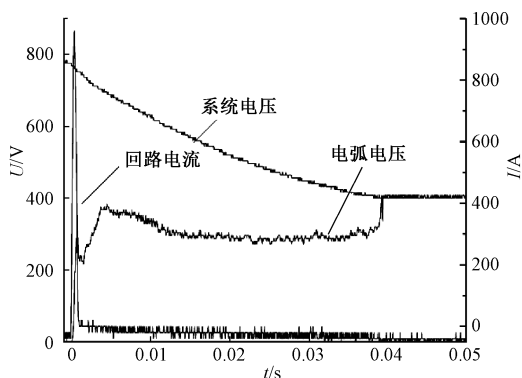
3.1 金刚石颗粒熔丝熔断试验

在 800V 电压,20mm 熔丝长度,受压(正上方施加 20N 压力)条件下,金刚石能够开断最大电流为 1.7kA,此时开断波形如图 3 所示。

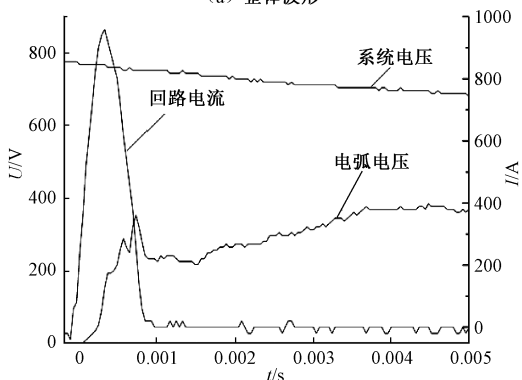
从图 3(a)中波形可以得到,回路实际最大电流为 986A,电弧燃烧时间 38.8ms,电弧电压在 300~400V 范围内。系统最后能够承担 408V 恢复电压。10mm 熔丝长度条件下,金刚石能够开断的最大电流为 1.5kA,可承担恢复电压降低至 404V,后续实验波形图与图 3 类似。

在不同预加电压等级下,电压源电压下降幅度平均约为 350V,此时能够开断的最大电流大小未出现明显变化,由此可推断,金刚石在熔丝试验条件下,电压对开断电流大小影响较小,燃弧时间较为稳定,且金刚石燃弧后至少可以承担 400V 恢复电压。

在松散状态时,金刚石的灭弧能力下降明显,仅能在 700V,熔丝长度 20mm 条件下开断 1kA 电流,且燃弧时间增加为 50ms 以上,电弧电压也有所下降,约为 70~80V,最终仅能承担约 300V 恢复电压。



(a) 整体波形



(b) 放大波形

图 3 金刚石直流熔丝试验波形

Fig. 3 Fusing test wave of diamonds

初步分析为松散状态下,电弧冲击力较大,导致内部颗粒被等离子体冲散,从而导致灭弧性能下降。

3.2 空气与 CO_2 燃弧对照试验

使用空气作为灭弧介质时,无法在试验条件下开断电流,需要对试验条件进行一定更改,由于熔丝长度的改变不利于与其余介质进行对比,因此选择将短路电流峰值降低来进行对比。

在熔丝长度 20mm,电容预充电压 800V,回路电流峰值 600A 条件下,空气电弧燃烧时间为 76.3ms,系统最终能够承担 98V 恢复电压,试验波形如图 4 所示。从图 4 中可以看出,空气燃弧电压仅为 50V 左右。而 CO_2 气体在 700A 条件下,其电弧燃烧时间 64.3ms,系统最终能够承担 152V 电压,弧压平均为 100V,如图 5 所示。

3.3 熔丝熔断试验结果及分析

通过以上三种变量下金刚石、空气和 CO_2 的燃弧波形的对比,可以得出以下结论:

(1) 金刚石颗粒对短路电流峰值具有一定限制作用,这是因为它的燃弧电压较高,可达到 300V 以上,较高的弧压能够阻止电容继续放电。对于灭弧性能影响最大的是金刚石的密度,其次是熔体的长

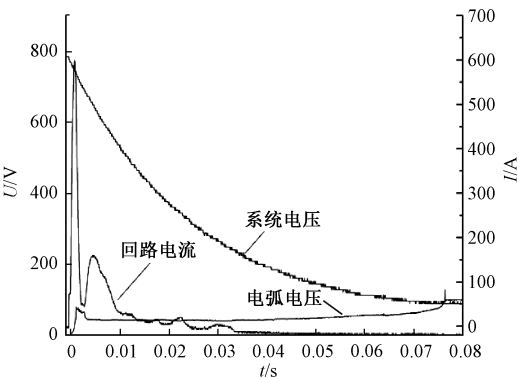


图 4 空气直流熔丝试验波形图
Fig. 4 Fusing test wave of air

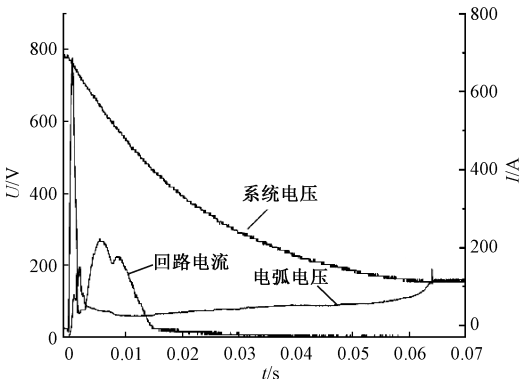


图 5 CO₂ 气体直流熔丝试验波形图
Fig. 5 Fusing test wave of CO₂

度,低压条件下电压的影响相对较小。

(2)和空气及 CO₂ 相比,采用金刚石作为灭弧介质能够有效提高燃弧电压,提升幅度约为空气的 6~8 倍,缩短燃弧时间至空气的 1/3,提升系统最终可承受恢复电压,最高可以达到 408V。

(3)经过数次试验后,金刚石颗粒未出现板结或熔化情况,其表面特性目视未出现较大变化,但开断性能有所下降,推测为灭弧时受到空气氧化所致,因此可以加入 CO₂ 气体等绝缘气体避免该种情况。

4 拉弧试验及分析

4.1 灭弧室与触头结构设计

金刚石颗粒属于固体颗粒,而断路器触头一般是为了在真空或气体环境中使用,设计时会尽量避免使细微颗粒附着于触头表面^[20],因此目前低压断路器灭弧室填充金刚石颗粒后无法正常工作,需要对触头结构进行重新设计。

常见的低压触头结构为接触式触头和插入式结构^[21],接触式触头在合闸时无法避免金刚石颗粒进

入触头间隙中,会造成合闸困难甚至合闸失败,插入式触头具有一定的自洁功能,能够有效避免接触面之间混入金刚石颗粒,因此选用插入式触头。

考虑到在低压领域开关设备的小型化需求,本文设计了一种可利用金刚石颗粒作为灭弧介质的灭弧室和触头结构,其简易结构图如图 6 所示。

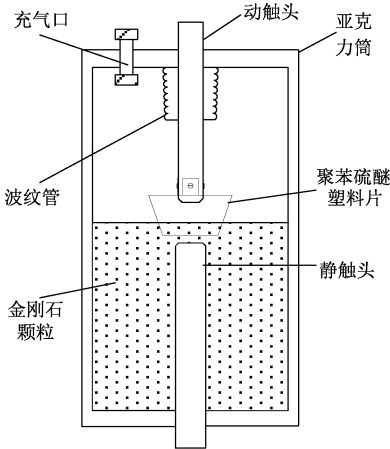


图 6 微米级金刚石颗粒拉弧灭弧室结构
Fig. 6 Interrupter structure of micron size diamonds

图 6 为分闸状态下的灭弧室结构,其触头最大分断距离为 10mm。该灭弧室外壳选用可拆卸式亚克力桶,其一端端盖可拆卸,供填充金刚石颗粒,且两端端盖开有孔洞供动静触头伸入,整个亚克力灭弧室采用胶圈与密封胶密封。动静触头均用铜质抛光管材,管壁厚度均为 2mm,动触头内直径等于静触头外直径,使其能够紧密接触,并减少金刚石颗粒卡在触头间的几率。外形类似于漏斗的聚苯硫醚塑料片是金刚石颗粒的推动装置,使用四个相同材质的塑料片将其固定在动触头上,利用永磁机构拉力在拉动动触头上移时带动触头间隙内金刚石颗粒流动,下部开口让金刚石颗粒在重力作用下向下流动,在一定程度上加快金刚石颗粒运动,尽量减小分合闸阻力,但金刚石颗粒仍会附着在触头表面,经测试,填充金刚石颗粒后,合闸电阻增加约 0.031Ω。

4.2 直接拉弧试验

在不安装聚苯硫醚塑料片的条件下,从灭弧室上端盖填充金刚石颗粒,使金刚石颗粒的堆叠形式为自然堆叠,填充高度至静触头顶以上约 30mm,直接进行拉弧试验,试验条件为最大预期峰值电流 2kA,预加电压 700V,其余试验条件与熔断试验相同,拉弧时刻为电流上升阶段 1ms 左右。试验波形如图 7 所示。

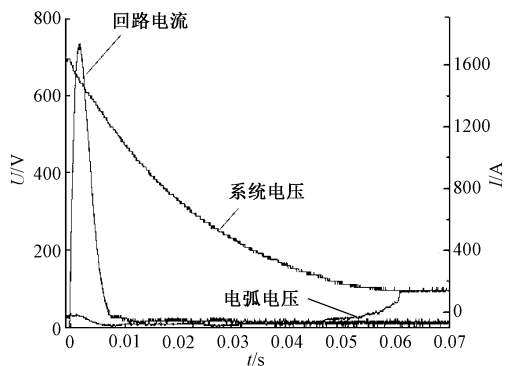
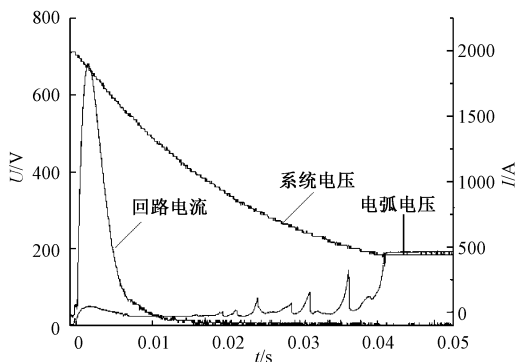


图7 金刚石颗粒直接拉弧波形

Fig. 7 Arc fusing wave of diamonds

金刚石直接拉弧的试验结果与金刚石颗粒松散状态下的熔丝试验类似,其电弧电压比空气拉弧时有所提升,空气条件下直接拉弧燃弧电压仅为 20~30V,金刚石颗粒能够接近 90V,但燃弧时间及电流源放电时间变长,且能承担的恢复电压较低,为 101V,和空气拉弧的 102V 相接近。

在灭弧室中充入一个标准大气压 CO_2 气体后,得到的试验波形如图 8 所示。从波形图可以得到,此时 CO_2 气体的燃弧时间为 42.6ms,弧压为 25V 左右,系统最终电压为 196V。

图8 CO_2 气体直接拉弧波形Fig. 8 Arc fusing wave of CO_2

CO_2 气体的燃弧电压低于金刚石颗粒,但燃弧时间短于空气。金刚石颗粒的燃弧时间为 60ms 左右,同样条件下空气燃弧时间通常在 70ms 以上,而 CO_2 气体燃弧时间约为 40~50ms。并且能够承受的系统恢复电压也相对较高,多次试验中最高可以承受 240V 恢复电压。通过直接拉弧试验,验证了相同条件下, CO_2 气体的灭弧性能强于空气,与理论相符,因此同时验证了本试验方案的可靠性。

从熔丝试验可以推测出空气、 CO_2 气体灭弧速

度理论上应当小于金刚石颗粒,但实际试验中出现了金刚石颗粒介质恢复较差的结果。本文认为造成这种现象的原因可能是因为金刚石颗粒处于松散状态,在触头运动过程中,触头的运动速度远大于金刚石颗粒受重力作用运动的速度,形成空隙,因此在触头间隙中产生的电弧无法受到金刚石颗粒的冲击,造成了灭弧性能的下降。

为了尽量减少触头拉弧时产生的空隙,需要针对试验方法采取改进措施。由于金刚石颗粒硬度较高,且颗粒直径较小,使用真空泵和气吹的试验方式可能会造成气泵损坏,实施难度较大。而使用机械力推动金刚石颗粒,冲击电弧使电弧分断的试验方案则相对可行,且推动方式设计在灭弧室内,有利于维持良好的气体环境。

4.3 机械力推动金刚石拉弧试验

在图 6 所示的灭弧室结构中安装聚苯硫醚塑料片后,动触头在永磁机构的拉力下,可在开断过程中带动部分金刚石颗粒运动,加速金刚石颗粒在灭弧过程中的运动速度,也可部分控制金刚石颗粒的运动轨迹,能够在灭弧过程中缩小因触头运动速度远大于颗粒运动产生的空隙,相当于增大了金刚石颗粒体系的密度,可吸收更多电弧能量,故能够提升灭弧性能。同时下部开口也可让金刚石颗粒在重力作用下下落,避免动静触头合闸困难。由于聚苯硫醚塑料片具有一定刚性,因此在合闸时可以插入金刚石颗粒中,恢复初始位置,能够多次分合闸使用。

由于颗粒物质的力学模型尚未成熟,故金刚石颗粒在此推动力下的运动模式及对电弧的冲击过程目前不能进行具体的定量分析^[22],但通过是否带动金刚石颗粒运动,可以定性地分析机械力推动对金刚石颗粒灭弧的影响。其波形图如图 9 所示。

采用机械力推动金刚石颗粒进行灭弧试验后,燃弧时间明显缩短,从 60ms 左右缩短为和熔断试验中相接近的 30ms 左右,并提升了所能承受的恢复电压,达到 282V。由此可以得出,虽然使用机械力冲击电弧的方式不能明显提高弧压,但能够有效提高金刚石颗粒的灭弧速度,减少燃弧时间。

4.4 CO_2 气体条件下机械力推动金刚石拉弧试验

综合以上结果,可以看出固态金刚石颗粒的灭弧性能受气体环境影响,同时也受到灭弧时金刚石颗粒的运动状态影响,因此采用 CO_2 作为环境气体,并加入机械力推动金刚石运动,可以近似反映金刚石颗粒的理论灭弧能力。试验波形如图 10 所示。

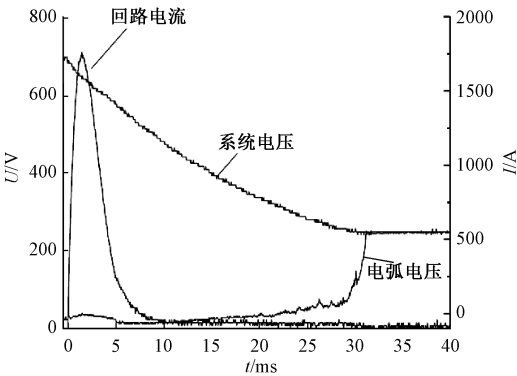


图 9 机械力推动金刚石拉弧波形

Fig. 9 Experimental waveform of diamond particles under mechanical impact

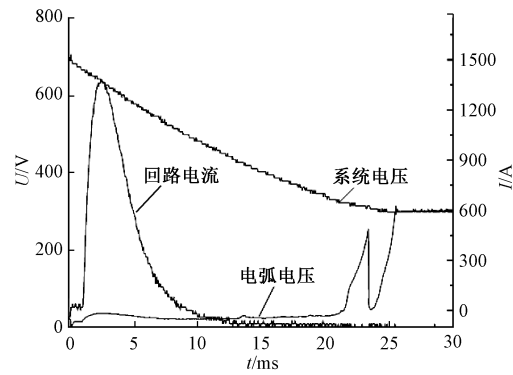


图 10 CO₂ 气体环境下机械力推动金刚石试验波形

Fig. 10 Experimental waveform of diamond particles under mechanical impact and CO₂ condition

从图 10 可以看出,充入 CO₂ 气体和使用机械力冲击对金刚石颗粒的灭弧速度提升较大,燃弧时间为 26.2ms,系统实际最大电流 1460A,最终可承受恢复电压 308V。金刚石颗粒使用次数较多造成了金属颗粒沾染,所以弧压及恢复电压有所降低,而 CO₂ 气体在此时进行辅助灭弧。

4.5 拉弧试验结果分析

试验中三种灭弧介质的燃弧时间和弧压(电弧电压)分布图如图 11 所示。

根据试验中微米级金刚石颗粒与空气、CO₂ 气体燃弧电压和燃弧时间对比,可以发现加入金刚石颗粒后提升了电弧的燃弧电压,比空气灭弧时提升 5~6 倍。金刚石颗粒为绝缘物质,能够对电弧产生分割作用,从微观上拉伸了电弧,使得电弧电导率下降,由直流电弧的伏安特性曲线^[23]可以推断,电弧电压相应升高。而充入 CO₂ 气体和使用机械力推动金刚石则可以明显缩短燃弧时间,令去游离速度

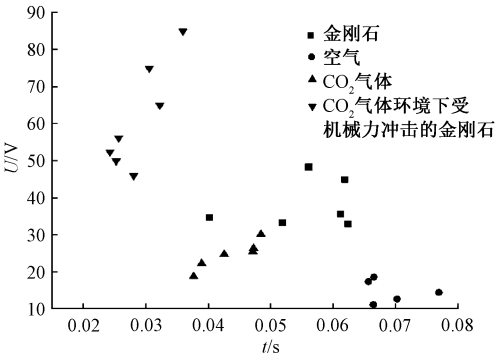


图 11 金刚石颗粒、CO₂ 气体、空气燃弧时间和弧压对比

Fig. 11 Comparison of arc time and arc voltage between diamond particles, CO₂ and air

加快,使金刚石的灭弧速度增加约一倍。

对燃弧 40ms 内的金刚石颗粒、空气、CO₂ 气体的燃弧电阻进行分析,结果如图 12 所示。拉弧试验中,在大电流阶段(10ms 内),金刚石颗粒燃弧电阻迅速增加,平均值可以达到 11.36Ω,而 CO₂ 气体在此时弧阻平均为 1.43Ω,而空气弧阻最低,平均为 0.02Ω;在电流拖尾时间内,金刚石的弧阻平均值为 13.21Ω,CO₂ 气体弧阻平均值为 3.75Ω,空气的弧阻平均值为 0.55Ω。因此可以判定,金刚石颗粒燃弧电压较高的主要原因就是燃弧电阻相对较大。

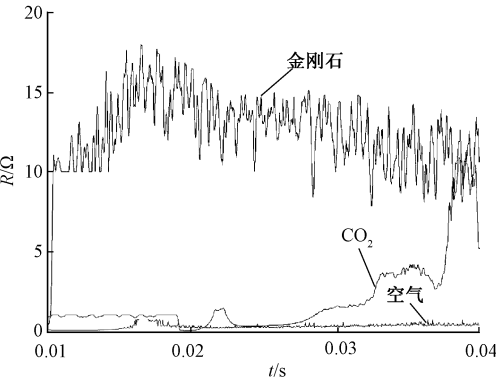


图 12 金刚石颗粒、CO₂ 气体、空气燃弧电阻大小对比

Fig. 12 Comparison of arc resistance between diamond particles, CO₂ and air

5 结论

本文以 50μm 级金刚石颗粒为例,研究并讨论了固态流体颗粒作为 400V 低压直流断路器的灭弧介质的可能性,依据电弧熄灭的原理设计了相应试验方案,根据试验结果,可以得到以下结论:

(1)微米级金刚石固体颗粒可以有效提高电弧

电压,相比于传统空气灭弧室,弧压提高 5~6 倍,进而其灭弧时间缩短为空气灭弧的 1/3 左右,初步验证了微米级金刚石固体颗粒作为低压直流灭弧的可行性。

(2)设计了一种可利用金刚石颗粒作为灭弧介质的低压直流断路器样机,进行金刚石颗粒、CO₂ 气体和空气拉弧试验,分析得到金刚石颗粒能够提升电弧电压和减少燃弧时间的主要因为它燃弧电阻较高,可达 10Ω 以上。但其可承受的恢复电压相对不足,需要进一步的优化结构,提高分闸速度。

(3)固态流体颗粒物质作为新型灭弧介质,在低压条件下的灭弧性能强于常压空气与 CO₂ 气体,具有灭弧时间短、可承受恢复电压相对较高、以及限制短路电流峰值等特点,本文初步验证了其直流灭弧性能,为新型固体颗粒灭弧低压直流断路器的研制奠定了基础。

参考文献 (References):

- [1] 黄金强, 廖敏夫, 葛国伟, 等 (Huang Jinqiang, Liao Minfu, Ge Guowei, et al.). 直流微网混合式零电压开关直流断路器 (Zero-voltage-switch hybrid DC switch for DC microgrid) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (9): 3148-3155.
- [2] 陈超, 刘文君, 俞天毅, 等 (Chen Chao, Liu Wenjun, Yu Tianyi, et al.). 基于直流系统故障保护的三端口直流断路器拓扑研究 (Topology research of three-port solid state circuit breaker based on DC system fault-protection) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (6): 58-64.
- [3] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等 (Wu Weimin, He Yuanbin, Geng Pan, et al.). 直流微网研究中的关键技术 (Key technologies for DC Micro-Grids) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (1): 98-106, 113.
- [4] 蔡冰倩, 贾利虎, 朱永强, 等 (Cai Bingqian, Jia Lihu, Zhu Yongqiang, et al.). 直流微电网电压等级序列选择的影响因素研究 (Research on influence factor of voltage class series option in DC microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (12): 45-51.
- [5] 吴俊勇, 裴丛仙子, 边国潮 (Wu Junyong, Pei Congxianzi, Bian Guochao). 光伏并网配电网中柔性环网开关的优化运行控制策略研究 (Study on control strategy for optimum operation of soft normally-open points (snops) in distribution network with PV generation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 20-28.
- [6] 薛士敏, 齐金龙, 刘冲 (Xue Shimin, Qi Jinlong, Liu Chong). 直流微网保护综述 (A research review of protection for DC microgrid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (13): 3404-3412, 3359.
- [7] 朱永强, 贾利虎, 王银顺 (Zhu Yongqiang, Jia Lihu, Wang Yinshun). 微电网结构设计的基本原则 (Basic design principles for micro-grid architecture) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (9): 44-49, 63.
- [8] 张鹏, 张杰, 朱毅, 等 (Zhang Peng, Zhang Jie, Zhu Yi, et al.). 空气直流断路器开断特性的分析验证 (Analysis and verification of the opening characteristic of DC circuit breaker) [J]. 机电工程 (Journal of Mechanical & Electrical Engineering), 2017, 34 (4): 412-415.
- [9] 何俊佳, 袁召, 赵文婷, 等 (He Junjia, Yuan Zhao, Zhao Wenting, et al.). 直流断路器技术发展综述 (Review of DC circuit breaker technology development) [J]. 南方电网技术 (Southern Power System Technology), 2015, 9 (2): 9-15.
- [10] 邱清泉, 肖立业, 张志丰, 等 (Qiu Qingquan, Xiao Liye, Zhang Zhifeng, et al.). 高压及超高压故障电流限制技术分析 (Analysis of fault current limiting technology used in high voltage and ultrahigh voltage power grid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (10): 46-54.
- [11] Gilvanejad Mojtaba, Abyaneh Hossein Askarian, Mazlumi Kazem. Fuse cutout allocation in radial distribution system considering the effect of hidden failures [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2012, 42 (1): 575-582.
- [12] 陈德桂 (Chen Degui). 直流开断技术的进展与新型直流断路器 (Development of modern DC switching technologies and new type of DC circuit breaker) [J]. 电器与能效管理技术 (Electrical & Energy Management Technology), 2014, (21): 1-5.
- [13] 王蕾, 陈乐生 (Wang Lei, Chen Lesheng). 开关电弧仿真数学模型研究进展 (Research status of simulation mathematical model of switching arc) [J]. 电工材料 (Electrical Engineering Materials), 2013, (3): 32-40.
- [14] 袁志方, 庄劲武, 王晨, 等 (Yuan Zhifang, Zhuang Jinwu, Wang Chen, et al.). 石英砂对电磁斥力高速开断器介质恢复特性的影响 (Influence of silica sand on dielectric recovery characteristic of high-speed electromagnetic repulsion isolators) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (1): 294-299.

- [15] 赵忠魁, 孙清洲, 张普庆, 等 (Zhao Zhongkui, Sun Qingzhou, Zhang Puqing, et al.). 石英砂加热时的相变与膨胀性研究 (Phase transformation and expansibility of quartz sands during heating) [J]. 材料工程 (Journal of Materials Engineering), 2006, (10): 25-27.
- [16] 杨经绥, 徐向珍, 白文吉, 等 (Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Bai Wenji, et al.). 蛇绿岩型金刚石的特征 (Features of diamond in ophiolite) [J]. 岩石学报 (Acta Petrologica Sinica), 2014, 30 (8): 2113-2124.
- [17] 程显, 焦连曜, 葛国伟, 等 (Cheng Xian, Jiao Lian-yao, Ge Guowei, et al.). 真空间隙与 CO₂ 气体间隙串联的混合断路器电场仿真计算 (Simulation of electric field distributions in vacuum/CO₂ gaps of hybrid circuit breaker) [J]. 真空科学与技术学报 (Chinese Journal of Vacuum Science and Technology), 2016, 36 (12): 1356-1362.
- [18] 程显, 陈占清, 王要强, 等 (Cheng Xian, Chen Zhanqing, Wang Yaoqiang). 真空间隙与 CO₂ 气体间隙串联开断大电流机理仿真研究 (Simulation of high-current interruption of circuit breaker with vacuum and CO₂ gaps connected in series) [J]. 真空科学与技术学报 (Chinese Journal of Vacuum Science and Technology), 2016, 36 (9): 1010-1016.
- [19] 袁志方, 沈兵, 余跃听, 等 (Yuan Zhifang, Shen Bing, Yu Yueting, et al.). 直流限流熔断器的合成试验方法研究 (Research on synthetic circuit of direct current-limiting fuse) [J]. 低压电器 (Low Voltage Apparatus), 2011, (24): 10-13.
- [20] Yu Haibo, Kesim M Tumerkan, Sun Yu, et al. Extended aging of Ag/W circuit breaker contacts: Influence on surface structure, electrical properties, and UL testing performance [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25 (1): 91-101.
- [21] Pei Xiaozhe, Smith Alexander C, Shuttleworth Roger, et al. Fast operating moving coil actuator for a vacuum interrupter [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32 (3): 931-940.
- [22] Nevzlin B I, Dyachenko Y Y. Analysis of methods of calculation of electric field in granular material [A]. 1998 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory [C]. Nevzlin, 1998, 1: 234-236.
- [23] Wang Haichao, Hu Shengsun, Wang Zhijiang, et al. Arc characteristics and metal transfer modes in arcing-wire gas tungsten arc welding [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86: 925-933.

Discussion on performance impact of micron sized diamond particles to interrupt DC 400V arc

CHENG Xian^{1,2}, WANG Hua-qing^{1,2}, GE Guo-wei^{1,2}, YANG Pei-yuan¹, CHEN Zhan-qing²

(1. College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Engineering Research Center of Power Transmission & Distribution Equipment and Electrical Insulation, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to explore the application of the solid-state fluid particles, a new arc extinguishing material, in the 400V DC micro network, and to provide a new method for the arc extinguishing for low voltage DC circuit breaker, this paper choose the micron diamond particles as the arc extinguishing medium for the 400V DC circuit breaker. A DC synthesis circuit is designed, which can provide 2kV, 3.5kA fault current, and its fault current rising rate is 1.3kA/ms. An interrupter that is used to test its arc extinguishing performance is also built. At voltage of 800V and peak value of fault current of 1-2kA, the diamond particles fuse arc test and control mechanism of arc test are carried out. Using air and CO₂ to break short faults the different influences between these three kinds of material are analyzed. The experimental results show that using 50 micron diamond particle as arcing medium, it can effectively enhance the arc voltage, about 5-6 times as compared with air. Using mechanical force to flush the diamond particles, or inflating CO₂ gas to change the air condition, can both effectively enhance the arc extinguish velocity. At last the paper puts forward the measures of using micron diamond and similar substances in the low voltage DC circuit breaker as arc extinguishing medium and other improving methods.

Key words: micro size diamond particle; circuit breaker; low-voltage DC circuit breaker; DC interruption