

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.018

液态金属限流器中电弧放电特性实验研究

孙毅卫¹, 李珂¹, 孙振权¹, 杨倬², 何海龙², 吴翊², 纽春萍²

(1. 陕西省地方电力(集团)有限公司, 西安 710061; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 电弧放电行为是影响磁收缩型液态金属限流器限流特性的关键因素之一。为了研究其电弧放电特性, 设计了带有透明观察窗的单隔板实验装置, 采用 LC 振荡回路模拟短路电流, 进行了不同通孔材料下电弧行为及其演变特性的实验研究。结果表明: 液态金属电弧形态发展过程可分为起弧、电弧拉伸、弧区收缩及熄弧 4 个阶段。另外, 通孔材料侵蚀所产生的强大气压会显著影响电弧行为及限流特性, 一旦腔体内部气压过大, 在燃弧后期易出现电弧在电流过零前熄灭的现象, 不利于限流器对短路电流的限制。相较于石英玻璃, 有机玻璃和 GPO-3 作为通孔材料可较大程度加快电弧发展、提高电弧电压, 但其材料烧蚀严重影响限流器使用寿命, 未来有必要继续探索新型耐高温材料。

关键词: 液态金属; 磁收缩效应; 电弧放电特性; 气压测量; 通孔材料

Experimental Study of Arc Discharge Characteristics in Liquid Metal Current Limiter

SUN Yiwei¹, LI Ke¹, SUN Zhenquan¹, YANG Zhuo², HE Hailong², WU Yi², NIU Chunping²

(1. Shaanxi Regional Electric Power(Group) Co., Ltd., Xi'an 710061, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Arc discharge behavior is one of the key factors on current limiting characteristics of liquid metal current limiter based on magnetic pinch effect. A single separator experimental device with transparent viewing window is designed for the study of arc discharge characteristics. The short circuit current is simulated by LC oscillating test circuit. The experimental study on arc behavior and its evolution characteristics of different channel materials is finished. The experimental results indicate that the arc evolution can be classified into four stages including arc ignition, arc elongation, arc constriction and arc extinction. The arc behavior and current limiting characteristic are influenced by the strong pressure generated by ablation of channel materials. The arc will extinguish before current zero if the pressure is too large inside the enclosure. This phenomenon is not conducive to the current limiting of LMCL. Compared to quartz glass, plexi glass and GPO-3 can accelerate the development of arc and improve the arc voltage, but the arc ablation of them seriously affect the lifetime of LMCL. It is necessary to explore new thermo materials.

Key words: liquid metal; magnetic pinch effect; arc discharge characteristics; pressure measurement; channel material

0 引言

随着中国工业及经济的飞速发展, 电力系统也

在朝着更高电压等级和更大容量输电的方向不断迈进。在此过程中, 电力系统的安全与可靠性始终是研究人员关注的重点。短路故障作为影响电力系统安全可靠的重要因素之一, 长久以来受到人们的广泛

收稿日期: 2016-02-11; 修回日期: 2016-03-24

基金项目: 国家 973 专题项目(2015CB251005); 自然科学基金资助项目(51521065, 51577145, 51377128)。

Project Supported by National Key Basic Research Program of China(973 Program)/(2015CB251005), National Natural Science Foundation of China(51521065, 51577145, 51377128)。

关注。系统一旦发生短路故障,其短路电流可在数ms至数十ms内上升至额定电流的几十到上百倍^[1-4]。短路电流所产生的热效应和电动力效应会对设备和线路造成严重的冲击,如果未能及时切断故障,将会造成系统内电气设备的永久性损坏^[5-6]。因此,如何快速有效地限制短路电流,降低系统的短路容量,提高系统中电气设备的可靠性和使用寿命,成为当前电力系统安全运行所面临的迫切问题^[7]。基于液态金属磁收缩效应的限流器利用液态金属在故障电流流过时发生快速收缩现象,并通过装置内部产生的电弧来抵制系统电压达到限流的目的^[8]。基于以上原理,磁收缩型液态金属限流器具有体积小、无可动部件、自触发和自恢复、全封闭免维护,且可作为限流保护装置与开关等设备配合灵活等优点^[9],国内外研究者对其开展了大量研究。

文[10]对于液态金属(66%Ga, 20.5%In, 13.5%Sn按重量配比)磁收缩物理过程开展了大量研究。通过ANSYS软件并采用有限元法对液态金属通电后的流场和压力场进行计算,通过假设通孔壁面处压力为零时为液态金属限流器的起弧时刻,对不同电流下的弧前时间进行计算;文[11]根据磁收缩型液态金属限流器中重力、惯性和电磁力的相互作用建立了非线性差分方程组,并提出了简化的H-through模型,其计算结果表明:通孔中的流体截面是电流的不连续函数,当电流达到特征值 I_c 时会发生跳变并导致收缩现象。此后,文[12]在该模型的基础上又提出T-through模型,在直流电流下对液态金属不稳定性进行分析,结果表明其收缩现象仅与特征电流 I_c 有关。然而,实际中液态金属收缩过程是暂态过程,其弧前时间与整个电流上升过程密切相关;文[13-14]针对简化的液态金属流注,建立了描述其非稳定性及收缩特性的一维潜水模型(Shallow water model),通过求解欧拉方程和自由液面演变方程对该流注的轴向和径向速度进行分析,最终获得收缩时刻的电流密度和反应时间。除仿真研究外,文[15]采用速度传感器和压力传感器对液态金属中不同位置的速度场和压力场的空间分布进行测量,为液态金属磁收缩物理过程的研究提供了实验依据。此外,国内近几年对液态金属磁收缩现象的研究也有相关报道,其中,文[16]采用有限元法,并结合湍流模型和MHD模型,对正常通流下液态金属的流场、压力场进行分析;文[17]通过实验方法首次观察到液态金属的收缩过程,并采用流体体积法(volume of fluid, VOF)方法和磁流体动力学(magnetohydrodynamics, MHD)理论建立了考虑自由表面的仿真模型,揭

示了自由表面在收缩过程中的作用。

以上研究主要针对磁收缩型液态金属限流器的弧前收缩过程,由于磁收缩型液态金属限流器主要通过液态金属收缩起弧后快速产生的电弧电压来达到限流的目的,电弧与液态金属共存使得整个物理过程非常复杂,因此,对于磁收缩型液态金属限流器电弧特性的研究鲜有涉及。在已报道的文献中,文[10]设计了专门的实验装置:通过机构带动浸于液态金属液池内的柱形电极,最终在电极与液池间形成液态金属桥,当该液态金属桥因收缩和拉长而发生断裂时,在电极与液池间形成自由燃烧电弧,通过光谱测量对该电弧组分和温度进行分析。其实验结果表明液态金属中的电弧主要为金属蒸汽电弧,且分析得电弧温度为11 700 K;文[18]通过实验观察了液态金属限流器中的电弧行为,通过在电极中嵌入耐高温陶瓷的方法避免了电弧对电极的侵蚀作用,延长其使用寿命。然而,目前对于腔体压力以及隔板材料对于磁收缩型液态金属限流器电弧特性的影响仍未见相关报道。

文中利用自行设计的实验模型,通过高速摄影技术对磁收缩型液态金属限流器中的电弧发展过程进行了实验观测,同时通过压力测量技术对起弧后限流器腔体内压力进行了实验测量。研究了起弧后腔体气压对液态金属电弧发展过程的影响,分析了实验中发现的电弧提前熄灭现象的原因。最后,研究了不同隔板材料对于电弧发展过程与电弧电阻变化趋势的影响。

1 实验装置与研究方法

文中所设计的限流器装置见图1。带有观察窗的液态金属限流装置,其中观察窗材料为有机玻璃,隔板材料可更换。

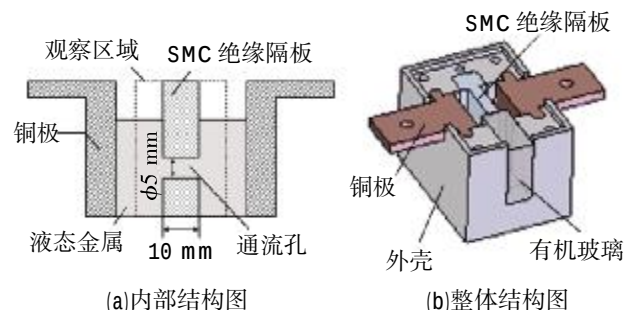


图1 实验模型结构图

Fig. 1 Experimental model diagram

正常情况下液态金属限流器腔体内部包含液态金属和空气两相,故障发生时液态金属会在电弧瞬间爆发力的作用下发生大量喷溅,同时由于装置体积较小,高温电弧距离器壁较近,因此对于腔体压力

的直接测量会导致结果不准确或损坏传感器。在图 1 的基础上在腔体上方增加了压力传递的过渡空间, 传感器安装在测压基座上, 防止其与电弧直接接触或液态金属在喷溅过程中覆盖传感器表面影响测量结果。其结构见图 2。

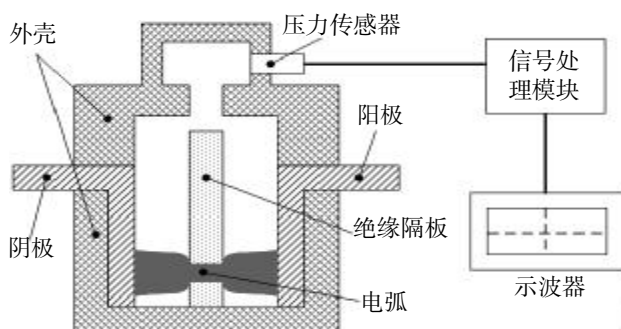


图 2 液态金属限流器燃弧压力测试原理图

Fig. 2 The schematic diagram for inner pressure measurement when arcing in a liquid metal current limiter setup

由于压力基座内径较小, 可忽略压力传递过程中造成的延迟和衰减, 即认为该处压力与腔体内部上方空间压力保持一致。实验中通过 102B16 型动压传感器对燃弧过程中的气压信号进行采集, 该信号经处理后通过示波器进行显示和存储。

该实验采用 LC 振荡回路来模拟短路电流, 见图 3。闭合 K_1 , 通过调压器向电容器组进行充电, 充电完毕后则断开 K_1 ; 放电时则闭合 K_2 , 放电电流通过电抗器 L 和限流器试品进行流通。该电容器容值为 35.2 mF, 回路电流峰值可通过预充电电压来调整; 电抗器的感值为 0.05/0.1/0.1/0.3 mH 4 个档位可调, 对应输出放电电流的周期为 8/12/16/20 ms。回路中串联的二极管仅允许首个电流周期的正半波流过限流器, 在电流过零后快速截止, 目的为防止限流器内部燃弧时间过长造成装置损坏。

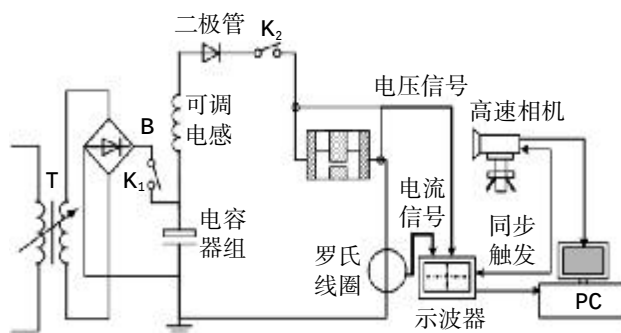


图 3 LC 振荡回路电路图

Fig. 3 The schematic LC oscillating test circuit

限流器两端的电压和回路电流分别通过电压探头和罗氏线圈进行测量, 该电压电流信号通过示波

器(TekDPO4032)进行存储和显示。实验中采用高速相机(Phantom V10)对液态金属形态进行拍摄, 其拍摄速率为每秒 36 000 张, 曝光时间为 10 μ s, 光圈数为 4, 相机通过回路电流信号进行同步触发。

实验采用图 1 所示的带有观察窗的单隔板实验装置, 其中绝缘隔板选用有机玻璃材料, 实验电路见图 3, 预期电流峰值为 8 kA, 周期为 16 ms。高速摄影仪采样率为 40 000 张/s, 曝光时间为 2 μ s, 在拍摄过程中还对装置上方压力进行测量。

2 液态金属中电弧演变过程

2.1 电弧演变过程

研究中通过对有机玻璃隔板条件下的电弧演变过程进行多次测量, 电弧均具有相似的发展过程, 见图 4; 相应的限流波形见图 5。由图 5 可见, 电弧在液态金属中的发展过程可由电弧电压或电弧电阻表征, 根据图 5 所示的电弧电压与电弧电阻随时间变化曲线, 电弧在液态金属限流器中的发展可分为 4 个阶段。

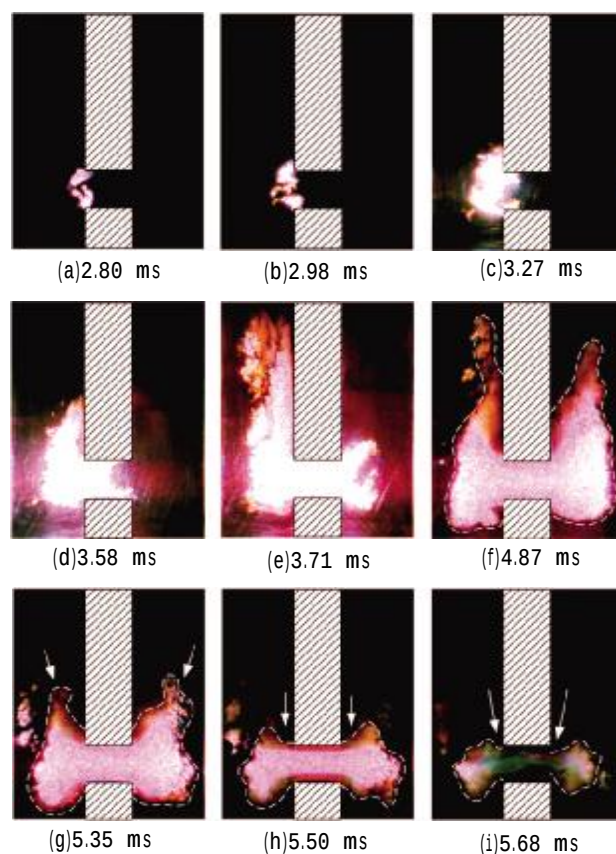


图 4 液态金属限流器中通过孔材料为有机玻璃时的电弧发展过程

Fig. 4 The arc behavior in the liquid metal current limiter setup captured by the high-speed digital camera

第 1 阶段为电弧产生阶段, 其起始于 $t=2.80$ ms, 持续至 $t=2.98$ ms。在此过程中, 电弧电压产生并急

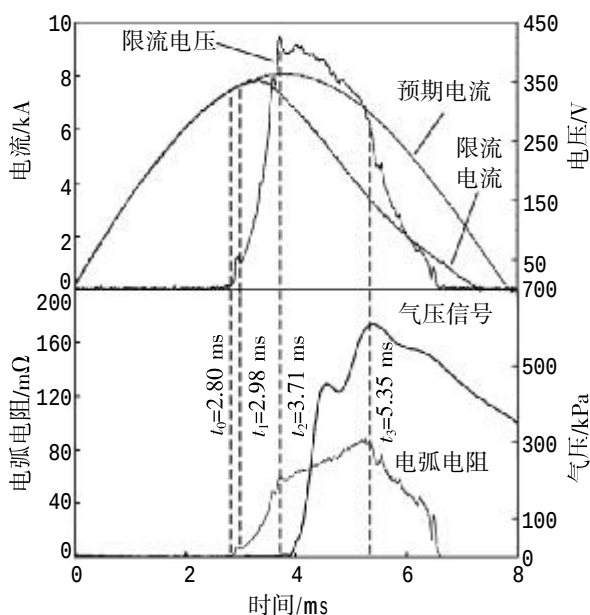


图5 电弧电流、电压与电阻波形

Fig. 5 Waveforms of arc current, voltage, arc resistance and pressure signal

速上升至 50 V 左右,电弧电阻产生并有同样的上升过程,但其上升速度没有电弧电压快。液态金属于 $t_0=2.80$ ms 时刻在隔板通孔左侧开始起弧,随着能量输入的不断增加,该微小电弧亮度不断增加且逐渐向周围膨胀至 $t_1=2.98$ ms,见图 4(b)。

第 2 阶段为电弧伸长阶段,起始于 $t=2.98$ ms,持续至 $t=3.71$ ms。在 $t=2.98$ ms 至 $t=3.58$ ms 过程中,通孔中电弧开始向周围发展,见图 4(d), $t=3.58$ ms 时电弧左侧边缘已基本与铜极接触,而其右侧只扩展至通孔右侧边缘处。此后,电弧继续伸长直至 $t=3.71$ ms 电弧完全贯穿于两侧铜极见图 4(e)。此时,电弧电压达到峰值 432 V。在此过程中,电弧电阻持续增加直至 59.7 mΩ。

第 3 阶段为电弧收缩阶段,起始于 $t=3.71$ ms,持续至 $t=5.35$ ms。在此过程中,电弧随着电流密度的减小而逐渐收缩见图 4(g),其中虚线所包围的区域为观察窗可见的电弧区域。电弧电压开始下降,同时电弧电阻继续上升,但其上升速度远低于第 2 阶段。

第 4 阶段为电弧熄灭阶段,起始于 $t=5.35$ ms,至到电弧完全熄灭。在此过程中,电弧电阻缓慢下降。电弧电压在 $t=6.62$ ms 时已下降至零,而此后限流器中仍然有电流流过。产生这种现象是由于液态金属回流至通孔内部,见图 4(i)。

2.2 腔体压力对电弧行为的影响

如图 5 所示,限流器起弧后,腔体内部气压产生于 $t=3.92$ ms。此时,电弧推动着包裹着其的液态金属向上运动,同时大量由电弧燃烧所产生的镓钢锡金属蒸汽进入空气所在的区域。这导致腔体内部气

压迅速上升直至 $t=4.58$ ms。随后,气压略有下降后继续上升,造成气压下降的原因可能是腔体壁面对于液态金属的反弹作用。此后,电弧区域开始收缩,同时液态金属开始向通孔靠近,如图 4(f)-(g)所示。图中虚线代表电弧与液态金属的分界线。当 $t=5.35$ ms 时,气压信号达到峰值 608 kPa 后开始缓慢减小,如图 5 所示。根据图 4(g)所示,虚线所围的电弧区域不断收缩,同时可观察到液态金属沿着箭头方向并顺着观察窗口内壁面不断向电弧弧心区域靠近。一方面,有机玻璃作为一种高分子化合物会在电弧烧蚀后迅速分解出大量的氢气、CO 和 CO₂ 的混合物^[9],其中氢气在高温下具有高的导热系数并有利于快速熄弧;另一方面,随着该密闭装置内电弧不断燃烧,腔体上方的压力不断增加,当电弧开始收缩并逐渐减弱时,电弧区域的温度与压力均有所降低,此时飞溅的液态金属在上下压力差的作用下向下运动并进入电弧区域,该液态金属液滴会部分短路电弧区域并造成电弧电阻缓慢降低。随后液态金属不断沿着隔板壁面和观察窗内壁面向通孔移动,如图 4(h)、(i)所示,电弧区域不断减小且电弧电阻和限流电压继续降低。有趣的是,随着液态金属被逐渐挤压进通孔并导通,电弧发生熄灭且电弧电阻在 6.62 ms 时刻减小为零,此时限流器中仍有电流流过。

实验表明电弧提前熄灭的现象与限流器腔体内部的气压变化趋势有关,若其峰值足够大且电弧持续收缩,那么液态金属上部的气体压力与电弧压力所产生的压力差将使液态金属提前回流至通孔中。在限流器实际运行过程中,这种现象将不利于其后级断路器分断故障电流。

3 不同隔板材料对电弧放电特性的影响

对于磁收缩型液态金属限流器来说,限流过程中产生的电弧被限制在绝缘隔板的通孔中,其作为一种高电流密度、高温和高压的热等离子体必然会与周围材料相互作用,如发生烧蚀、汽化等物理化学过程,该实验对不同通孔材料下液态金属中的电弧特性进行研究。选取有机玻璃、石英玻璃与 GPO-3 层压板作为隔板材料。其中,有机玻璃和 GPO-3 层压板作为电力开关中常用的绝缘材料,前者是由甲基丙烯酸甲酯聚合而成的高分子化合物,具有阻燃性和耐电弧特性;后者则主要含不饱和聚酯玻璃纤维,和有机玻璃一样具有机械强度高和易加工的特点。

3 种通孔材料下的电弧电阻见图 6。电弧电阻的上升率即电弧的拉伸过程是表征限流器电弧特性的重要参数。

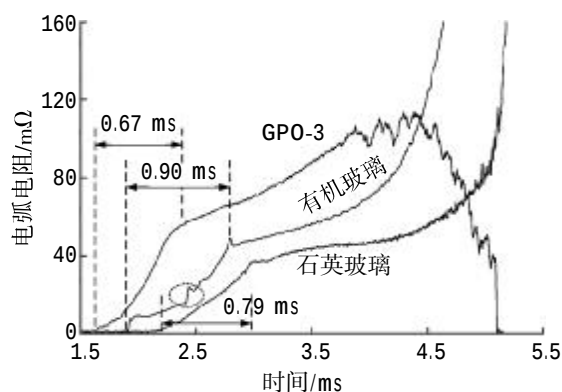


图6 3种通孔材料下的电弧电阻对比

Fig. 6 Arc resistance waveforms of three channel material

以下针对3种不同通孔材料的电弧电阻进行分析。由图6可知,隔板材料为GPO-3时,从起弧到电弧完全拉伸所需时间为0.67 ms,而有机玻璃和石英玻璃时则分别需要0.90、0.79 ms。对比第1、3种材料时的电弧拉伸过程,此时流经GPO-3通孔的电流比石英玻璃情况下的电流更小,但其电弧拉伸速度更快,主要由于通孔表面烧蚀后产生的气体对电弧拉伸具有一定的推动作用。对比后两者的电弧电阻上升过程可知,实验中当通孔材料为有机玻璃时出现了电弧电阻的跳跃,如图中虚线所示,该电弧电阻跳跃可能是由于隔板通孔两侧先后起弧所致。根据该跳跃之后的电弧电阻上升率,其电弧有效拉伸过程应比石英玻璃时较快,考虑到该过程中流经两种材料通孔的电流差别不大,因此可以断定通孔材料为有机玻璃时电弧拉伸速度更快。由于绝缘材料受热分解产生的气体对电弧具有一定的冷却作用,因此3种材料时当电弧完全拉伸时的等效电阻依次为65、45、37 mΩ。电弧在完全拉伸之后随着电流的不断减小开始进入收缩阶段,GPO-3和有机玻璃相比于石英玻璃其电弧电阻上升率也更快。

对比3种材料下的电弧特性,可知采用GPO-3层压板和有机玻璃时的不仅有利于电弧的快速发展,同时能够提高电弧电阻和改善限流特性。但实验中观察到这两种材料相比于石英玻璃烧蚀较为严重,而且通孔尺寸及表面形貌会在多次烧蚀后发生显著变化,进而影响液态金属磁收缩过程并导致限流器在多次使用后效果不太稳定。此外,尽管石英玻璃耐烧蚀性能良好且不是产气材料,但其机械强度低、质脆且不易加工,容易在电流较大时出现损坏,因此还需进一步寻找耐烧蚀且机械强度更高的绝缘材料作为通孔材料,比如特种陶瓷材料等。

4 结论

文中围绕磁收缩型液态金属限流器电弧放电行

为及特性开展了实验研究。首先通过实验的方法研究了液态金属限流器起弧后的电弧发展过程;其次,研究了限流器中起弧后腔体内的气压特性,并分析了电弧提前熄灭的原因;最后,利用实验方法对不同通孔材料(GPO-3、有机玻璃和石英玻璃)下的电弧特性进行研究,分析和讨论其对电弧演变过程的影响。

主要结论如下:

1)根据电弧形态、电弧电压以及电弧电阻的变化,磁收缩型液态金属限流器电弧的发展过程可分为:起弧、电弧拉伸、弧区收缩和电弧熄灭4个阶段。

2)电弧发展过程与其气压特性紧密相关,若腔体内气压峰值足够大且电弧持续收缩,那么液态金属上部的气体压力与电弧压力所产生的压力差将使液态金属提前回流至通孔中,导致电弧提前熄灭。在限流器实际运行过程中,这种现象将不利于其后级断路器分断故障电流。

3)相比于石英玻璃,有机玻璃和GPO-3作为通孔材料时,由于其在电弧高温烧蚀过程中具有很强的产气性,能够加快电弧拉伸过程同时也可有效提高了电弧电阻。但实验中观察到这两种材料相比于石英玻璃烧蚀较为严重,而且通孔尺寸及表面形貌会在多次烧蚀后发生显著变化,进而影响液态金属磁收缩过程并导致限流器在多次使用后效果不太稳定。此外,尽管石英玻璃耐烧蚀性能良好且不是产气材料,但其机械强度低、质脆,不易加工,容易在电流较大时出现损坏,因此还需进一步寻找耐烧蚀且机械强度更高的绝缘材料作为通孔材料。

参考文献:

- [1] 张运洲,李晖.中国特高压电网的发展战略论述[J].中国电机工程学报,2009,29(22):1-7.
ZHANG Yunzhou, LI Hui. Analysis on the development strategies of the UHV grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(22): 1-7.
- [2] 孙树敏,刘洪顺,李庆民,等.电力系统故障限流器研究综述[J].电网技术,2008,32(21):75-79.
SUN Shumin, LIU Hongshun, LI Qingmin, et al. A summarization of research on fault current limiter of power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 75-79.
- [3] 张铭.短路电流限制器技术综述[J].华东电力,2008,36(9):43-46.
ZHANG Ming. Review for short-circuit current limiters[J]. East China Electric Power, 2008, 36(9): 43-46.
- [4] STEURER M, FROHLICH K. Current limiters-state of the art[C]//Fourth Workshop & Conference on EHV Technology. India: [s.n.], 1998:1-7.

- [5] SCHMITT H, AMON J, BRAUN D, et al. Fault current limiters-application, principle and experience [C]//CIGRE WG A3.16. Tokyo: [s.n.], 2005: 1-5.
- [6] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: A review identifying future research needs [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [7] 江道灼, 敖志香, 卢旭日, 等. 短路限流技术的研究与发展[J]. 电力系统及自动化学报, 2007, 19(3): 8-19.
JIANG Daozhuo, AO Zhixiang, LU Xuri, et al. Research and development of short-circuit current limiting technology [J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2007, 19(3): 8-19.
- [8] YAMAGATA K, MATSUURA K, ITO T, et al. Self-restoring current limiter: United States, 3644860[P]. 1972-02-22.
- [9] 金 心. 国外自复式液体限流器发展概况[J]. 低压电器, 1989(5): 57-61.
JIN Xin. Overview on the self-healing liquid current limiter in foreign countries [J]. Low Voltage Apparatus, 1989(5): 57-61.
- [10] BERGER F, DUHR O, KRATZSCHMAR A, et al. Physical effect and arc characteristics of liquid metal current limiter [C]//9th Intconf on Switching arc phenomena. Lodz, Poland: [s.n.], 2001: 272-277.
- [11] THESS A, KOLESNIKOV Y, BOECK T, et al. The h-through: A model for liquid metal electric current limiters [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005(527): 67-84.
- [12] BOECK T, THESS A, TERHOEVEN P. A simple model for liquid metal electric current limiters [J]. Physics of Fluids, 2006, 18(5): 1-4.
- [13] ZIENICKE E, THESS A, KRATZSCHMAR A, et al. A shallow water model for the instability of a liquid metal jet crossed by an axial electrical current [J]. Magnetohydrodynamics, 2003, 39(3): 237-244.
- [14] ZIENICKE E, LI B W, THESS A, et al. Theoretical and numerical stability analysis of the liquid metal pinch using the shallow water approximation [J]. Journal of Thermal Science, 2008, 17(3): 261-266.
- [15] CRAMER A, GERBETH G, TERHOEVEN P, et al. Fluid velocity measurements in electro-vortical flows [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2004, 19(4): 665-678.
- [16] WU Huaren, LI Xiaohui, ZHANG Min, et al. Analysis and design of GaInSn current limiter [C]//Industry Application Conf 2006 41st IAS Annual Meeting. Florida, US: [s.n.], 2006: 2627-2630.
- [17] 刘懿莹, 吴 翊, 荣命哲, 等. 自收缩效应型液态金属限流器限流特性影响因素的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 178-185.
LIU Yiyi, WU Yi, RONG Mingzhe, et al. Study of influence factors on current limiting characteristics of self pinch effect type liquid metal current limiter [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 178-185.
- [18] 刘懿莹, 吴 翊, 荣命哲, 等. 基于自收缩效应型液态金属限流器中电弧行为特性的实验研究 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 192-198.
LIU Yiyi, WU Yi, RONG Mingzhe, et al. Experimental research of arc behaviour characteristics in liquid metal current limiter based on self pinch effect [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 192-198.
- [19] 万家震. 关于 60 千伏产气负荷开关选型问题的探讨 [J]. 吉林电力技术, 1984(1): 21-28.
WAN Jiazhen. Discussion about selection of 60 kV gas load switch [J]. Jilin Electric Power Technology, 1984(1): 21-28.
- 孙毅卫(1957—), 女, 高级工程师, 主要从事电力电网管理及运行方面的管理工作。
- 何海龙(1987—), 男, 助理研究员, 主要从事故障电流限制技术及应用研究工作。