

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.03.022

新型直流真空断路器强迫换流分断特性

张超, 刘路辉, 徐国顺, 江壮贤

(海军工程大学电气工程学院, 武汉 430033)

摘要: 基于强迫换流原理的新型混合型直流真空断路器是解决高上升率直流短路电流分断难题的有效方式。获知短燃弧、短间隙条件下真空开关大电流分断特性是快速直流真空断路器的研制基础。利用合成实验平台,研究了采用 CuCr50 平板型触头的真空开关,燃弧时间数百微秒,触头开距不足 2 mm 的条件下,分断 20 kA 左右电流的介质强度恢复特性。实验结果表明:真空开关分断电流 17 kA 时,以 110 A/ μ s 的速率换流过零后,经过 41 μ s 的近似零电压阶段的恢复,可以成功抗受 10 kV/mm 的电场应力,但延迟击穿重燃现象时有发生;分断电流 21 kA 时,电场应力不足 5 kV/mm 时,便会发生击穿重燃。通过触头结构设计,使开关分离拉燃电弧时形成双柱乃至多柱电弧成为改善真空开关分断特性的可行方法。

关键词: 直流真空断路器; 介质恢复; 微粒

Forced Commutation Interruption Characteristic of Novel DC Vacuum Circuit Breaker

ZHANG Chao, LIU Luhui, XU Guoshun, JIANG Zhuangxian

(College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The novel DC hybrid vacuum circuit breaker based on forced commutation principle is effective for fault protection in DC power system with small time factor. The realization of a rapid DC vacuum circuit breaker (VCB) depends on the knowledge of the high current interruption characteristics of a vacuum circuit breaker in the condition of short arcing duration and short gap. In this study, a synthetic test circuit was used to study the dielectric recovery of a VCB with CuCr50 butt contacts after interrupting 20 kA DC currents in the condition that the arcing time was hundreds of microseconds and the contact gap was not more than 2 mm. Experiment results showed that for interrupting the current of 17 kA with the decline rate of 110 A/ μ s, the VCB could still withstand electric field strength of 10 kV/mm after dielectric recovery time of 41 μ s, but delayed dielectric breakdown happened at times. When the interrupted current increased to 21 kA, the broken-down electric field strength was below 5 kV/mm. The interruption performance of VCB can be improved by using new contact structure to get multiple-column arc ignited at the moment contacts opening.

Key words: DC vacuum circuit breaker; dielectric recovery; particles

0 引言

当前,直流系统迎来了快速发展的黄金时期,由此带来了大规模的直流系统保护需求,使得针对不同应用各类直流开断技术成为了电器学科中新的研究热点^[1-7]。舰船和轨道交通领域直流电力系统对

中压直流断路器的要求较为苛刻,主要体现在额定电流大、分闸时间短、分断能力高等几个方面^[8-10]。为满足大的额定电流通流的要求,断路器触头系统通常较为笨重,大的触头开距难以快速建立。然而为了能够限流分断快速上升的短路电流,断路器必须在几个毫秒的时间内就完成分断动作,形成短燃弧、短间隙下分断大电流的技术难点。

收稿日期:2016-11-07; 修回日期:2016-12-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207166,51307179)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51207166,51307179).

基于强迫换流原理的新型混合型直流真空断路器通过在高速真空开关两端并联续流二极管,使真空开关在电流过零后因二极管的续流作用得到了近似零电压的介质恢复环境,同时将过电压的加载时刻后移,优化了分断条件,为实现短燃弧、短间隙下分断高上升率的短路电流提供了可能^[4]。作为断路器的核心,真空开关在短燃弧、短间隙条件下的强迫换流分断特性决定着断路器换流参数和控制策略的设计。这一应用工况与中压交流系统的真空断路器技术指标明显不同,与其他研究者开发混合型直流真空断路器时达到额定或较大开距后再投入换流电流的设计理念区别也很大,形成了新型直流真空断路器分断的特殊性,必须进行专门的研究。

真空开关能否在电流过零后成功开断,取决于真空开关间隙的介质强度与过电压的竞争。直流真空断路器的恢复过电压可以通过换流参数的合理设计进行调整。因此,获知特定条件下,真空开关介质强度恢复特性成为直流真空断路器设计的基础。文[12]利用可拆卸真空灭弧室,研究了真空开关基于强迫换流分断 3~5 kA 电流,燃弧时间 50 μ s 左右,触头开距约 0.5 mm 时,换流速率对电弧在电流过零点熄灭特性的影响,得到了一些基础数据。并总结认为:实验条件下,经过 50 μ s 左右的近似零电压恢复过程,真空间隙介电强度恢复到静态耐压水平,击穿电压幅值主要受触头表面影响;文[13~14]通过等效的介质恢复实验,研究了新型直流真空断路器分断过程中真空间隙的介质强度恢复规律,对大量实验结果进行了规律性的总结,拟合得到了实验条件下介质强度恢复规律的表达式。但文[13~14]实验中开断电流不足 2 kA,燃弧能量小于 1 J,与文中目标断路器额定电流 5 kA 以上、动作整定值 10 kA 以上的技术指标差别较大。

上述工作为短燃弧、短间隙条件下大电流分断特性研究奠定了一定的基础。文中利用合成实验平台,进行 20 kA 左右的电流水平下真空开关强迫换流分断特性的实验研究,得到了实验条件下的基础数据,并针对不同电流下开关间隙恢复特性及延迟击穿等实验现象进行了分析和讨论。

1 实验系统

为开展真空开关大电流下强迫换流分断特性的研究,开发了合成回路实验平台,见图 1。

该平台主要由低压电流回路、强迫换流回路、隔离二极管组件、真空开关、电压回路、测控系统 6 部分组成。低压电流回路通过选定不同的电容器 C_0 及

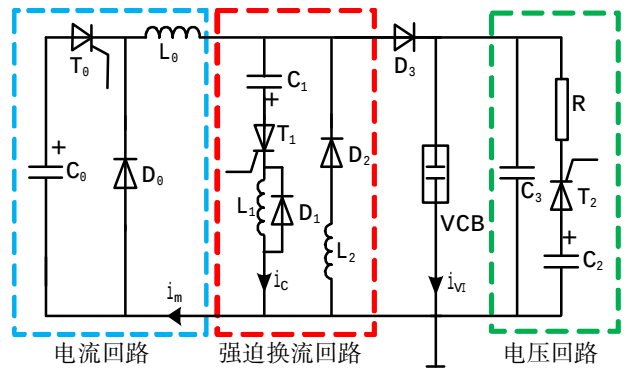


图 1 合成回路实验平台

Fig. 1 Schematic of experimental arrangement

其充电电压 U_0 , 并与不同的限流电感 L_0 配合,产生符合实验要求的电流, T_0 为放电晶闸管, 二极管 D_0 提供续流支路。电容 C_1 、晶闸管 T_1 、电感 L_1 、 L_2 和二极管理器件 D_1 、 D_2 构成强迫换流回路。当需要强迫真空开关电流过零时, 触发晶闸管 T_1 , 预先充电的电容 C_1 通过 L_1 放电, 主回路电流迅速向 C_1 - T_1 - L_1 支路转移, 开关 VCB 上电流快速下降直至过零。通过选定电容 C_1 及其充电电压 U_1 , 配合电感 L_1 、 L_2 可以获得不同的电流下降率; D_2 支路既可改变换流电流用于真空开关电流转移的比例, 还可提供换流电流大于主回路电流时的通路, 创造一个近似零电压的恢复条件。串联二极管组件 D_3 选用快恢复型二极管, 保证了真空开关电流开断后电压回路与低压电流回路的快速隔离。电压回路主要由高压电容 C_2 、放电开关 T_2 、限流电阻 R 和电容 C_3 构成。实验时, 电容 C_2 预充电至测试电压。调整不同的 C_3 及 R 的值, 可以调节加载在开关两端的恢复电压波形。电阻 R 用来限制高压回路输出的电流。采用无感分流器、罗氏线圈和电压探头分别测量流过真空开关的电流 i_{vt} 、换流电流 i_{c2} 、电弧电压和恢复过电压等电气参数, 各参数输入数字示波器进行存储。

根据文[15]中对不同的真空触头结构在高上升率直流短路电流分断场合适用性的分析, 实验中所用真空开关触头结构选择平板式, 材料为 CuCr50。真空开关采用电磁斥力进行驱动, 以获得尽可能短的固有分闸时间和较高的初始速度^[16]。为了测量高速真空开关的始动延时, 在触头两端串联 24 V 直流电源及 5 k Ω 电阻。机构合闸状态时电阻两端电压为电源电压, 当触头分离时电阻两端电压降为零。用直线位移传感器测量分闸过程中动触头运动特性。开关的分闸运动特性见图 2。图 2 中 0 时刻控制器发出分闸信号, 124 μ s 时真空开关实现电气分离, 初始分闸速度约 2 m/s。

选取幅值 6 kA 的电流进行分断实验得到的典

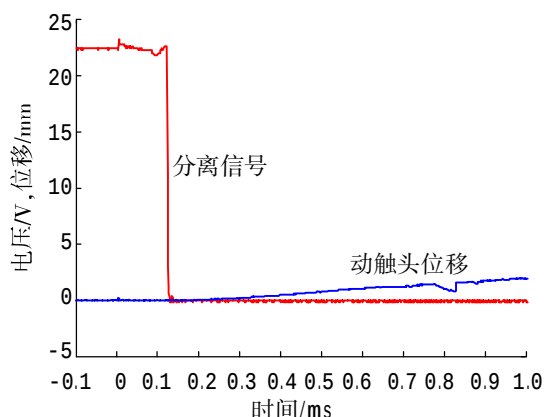


图2 动触头分闸位移曲线

Fig. 2 Movement of contact in separation

型分断波形图见图3。由图3可见,零时刻主回路导通,由于开关电压的测量点包含了部分导电回路(电感值约 $0.25\mu\text{H}$),图示开关电压中包含了由电流变化率形成的感应电势分量。 $308\mu\text{s}$ 时真空开关触头间生成电弧、建立弧压,分离电流约 5kA 。燃弧 $75\mu\text{s}$ 后换流电流投入,开关电流以 $55\text{A}/\mu\text{s}$ 的速率快速下降过零并成功截止,经过 $20\mu\text{s}$ 的近似零电压阶段后,测试电压以约 $200\text{V}/\mu\text{s}$ 的速率加载到 2.9kV 时发生首次击穿,但间隙未发生电弧重燃。经过一定恢复后,电压加载至 6.8kV 时,间隙再次被击穿。之后,电压再次上升,成功加载至设计电压最高值 7.7kV ,并保持 5min ,直到实验员对电压回路的电容进行人工放电。重复多次同参数的开断实验,可得到特定条件下,较可靠的真空开关零后介质强度的数据。

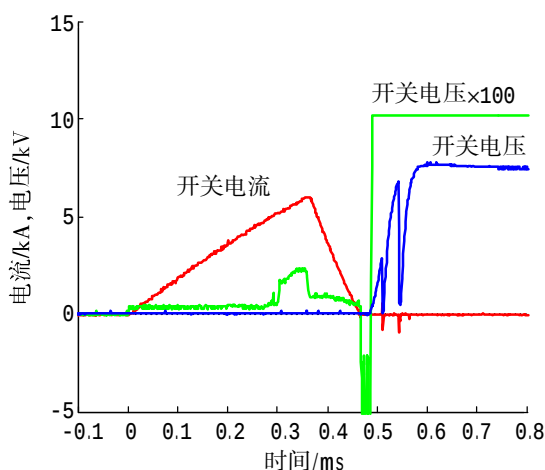


图3 分断电流6 kA时实验波形

Fig. 3 Waveforms of 6 kA interruption

2 实验结果

大电流实验会对真空开关触头造成一定的损伤,但大电流下的分断特性仅通过小电流分断实验难以准确获得。为获取真空开关大电流条件下强迫换流分断能力的数据及其特性,结合工业需求,选取

分断电流约 20kA ,开展短燃弧(数百微秒)、短间隙(小于 2mm)下真空开关强迫换流分断特性。根据文[12]的结论,为保证真空电弧在电流过零点成功熄灭,真空开关电流过零速率控制在 $100\text{A}/\mu\text{s}$ 左右,预留数十微秒的介质恢复时间后施加过电压。分别进行了幅值 17 、 21kA 的强迫换流分断实验,每个参数进行 10 次,可以得到相应参数下真空开关分断特性的基础数据。

实验后数据统计发现,实验参数下,真空开关电流在过零时均能成功截止,成功地进入近似零电压条件下的介质恢复阶段。分断电流 17kA 时,经过约 $40\mu\text{s}$ 的恢复后,真空开关间隙承担电场应力小于 $10\text{kV}/\text{mm}$ 的条件下,过电压可以成功加载至实验设计最高值,但 10 次同参数实验中,出现 3 次间隙承受过电压数百微秒后,击穿重燃的现象。将分断电流提升到 21kA 后,真空开关常常在过电压上升阶段(折算电场场强不足 $5\text{kV}/\text{mm}$)就会击穿重燃。实验结果如下所示。

2.1 电流 17kA 的分断过程

分断电流 17kA 时典型的重燃波形见图4。波形处理时,将开关分离、引燃电弧处选定为 0 时刻,波形主要展示开关电流、电压,下文相同。

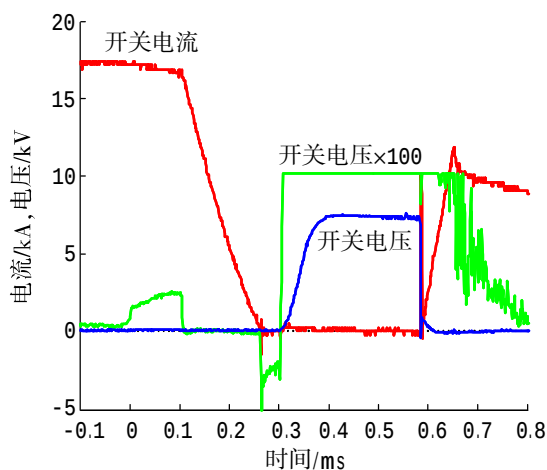
图4 分断电流 17kA 时实验波形

Fig. 4 Waveforms of 17 kA interruption

从图4可以看出,该次实验中,真空开关燃弧 $105\mu\text{s}$ 后投入换流电流,开关电流以约 $110\text{A}/\mu\text{s}$ 的速率换流过零。真空开关经历了时长 $41\mu\text{s}$ 的近似零电压阶段后,开始承受以 $130\text{V}/\mu\text{s}$ 的速率不断增长的过电压,过电压峰值约 7.5kV 。在过电压上升阶段,开关未发生击穿重燃。过电压持续约 $300\mu\text{s}$ 后,真空开关击穿重燃,电流重新导通。

2.2 电流 21kA 的分断过程

分断电流 21kA 时采集的典型波形见图5。

从图5可以看出,该次实验中,真空开关燃弧

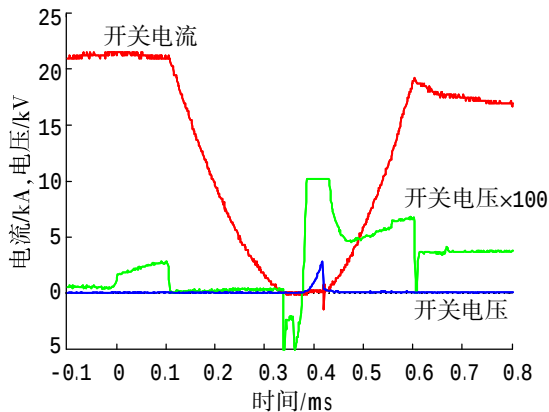


图 5 分断电流 21 kA 时实验波形

Fig. 5 Waveforms of 21 kA interruption

110 μs 后投入换流电流, 经过 230 μs 的换流过程, 开关电流下降过零并截止。开关间隙经历近似零电压恢复时间 38 μs , 过电压加载速率约 130 V/ μs 。过电压上升到 2.8 kV 时开关间隙击穿, 电流重新导通。

3 分析与讨论

大电流强迫换流过零后, 开关间隙之间仍旧存在着大量的离子、电子、金属蒸气和宏观微粒。这些粒子的消散特性决定了弧后开关间隙的介质恢复特性, 进而影响着真空开关能否成功分断。对于上述实验结果的分析, 也需紧紧围绕电流过零时, 开关间隙中粒子的浓度、分布, 及其消散特性展开。现有研究一般将真空开关的介质强度恢复过程分为以鞘层发展与暂态恢复电压互相作用为主的恢复前期, 以中性金属蒸气密度为主导的恢复中期和真空间隙达到全恢复至静态耐压特性的恢复后期 3 个阶段^[17]。新型直流真空断路器分断过程中, 过电压加载前, 开关首先经历数十微秒的近似零电压阶段。因此, 过电压加载过程中及后续的击穿重燃现象主要受金属蒸气和金属微粒的影响。

文中的研究对象具有短燃弧、短间隙的鲜明独特性。大电流电弧由触头分离引燃且燃烧仅数百微秒, 通过强迫换流的方式快速过零, 过电压建立时触头开距较短, 不足 2 mm。文[15]中通过对不同触头结构下电弧形态演化规律进行分析后指出, 无论哪种触头结构, 真空电弧引燃初期均呈现为收缩的桥柱形电弧, 压力较高, 且具有起始停滞现象, 而后才会因触头结构、电气参数的影响, 形成不同的演化现象。对于文中这种分断电流大于 10 kA, 触头开距小于 2 mm, 引弧时间仅数百微秒的分断, 换流电流投入和电流过零过程电弧处于相对集聚的收缩弧状态。结合文[18]中平板触头分离直流 8 kA 过程真空电弧形态演化实验, 可知大电流条件下, 电弧引燃处

电弧持续燃烧, 电极表面往往会形成熔融的斑点。实验后, 对真空灭弧室进行拆解, 电极表面燃弧痕迹也验证了这一推论。这就意味着弧后瞬间, 开关间隙中存在着相对集聚的金属蒸气和微粒, 电极表面存在明显的熔融区域, 不利于间隙的快速恢复。但另一方面, 由于燃弧仅数百微秒, 燃弧能量仅数十焦耳。触头材料一定的情况下, 金属蒸气和微粒的总量是有限的, 电极表面熔融区域和深度是有限的。因此, 电流较小时, 如分断 6 kA、经过数十微秒的恢复后, 开关间隙可以顺利抗受住 10 kV/mm 以上的电场应力。

分断电流 17 kA 时, 出现的分断特性不稳定现象, 与平板型触头引燃电弧时弧柱数量具有概率性有关。文[19–20]相继在电弧形态演化实验中, 发现了平板型触头引燃电弧时存在单柱燃弧和双柱燃弧两种情况。相同的分断参数下, 出现双柱燃弧时, 电弧功率密度及其对电极的侵蚀均要小于单柱燃弧的情况, 分断特性自然相对优良。电流进一步提升后, 残余物量大值高, 介质恢复过程更加缓慢。分断 21 kA 时, 由于间隙中存在的金属蒸气密度大、电极状态差, 即使出现双柱燃弧, 间隙电场应力在过电压上升阶段就达到了介质强度上限, 调波电容 C_3 和真空开关自身杂散电容的释放能量就可以使电弧重燃, 电流重新导通。

图 4 中所展示的延迟击穿现象则应归因于弧后间隙中金属微粒的影响。研究表明, 弧后的一段时间内, 电极热点不仅继续向开关间隙中提供金属蒸气, 还向外喷射金属微粒^[21]。文[21]中采用激光阴影技术拍摄到了金属微粒存在的照片, 通过实验得到了大多数阴极发射的微粒是在电流过零后数百微秒产生的结论。金属微粒通过向间隙中继续提供蒸气、离子和与电极的相互作用影响开关间隙耐受电压的情况^[22]。金属微粒自身具有一定的温度和速度, 运动过程中微粒表面将不断地蒸发或电离, 成为弧后间隙的一个重要的蒸气和离子源。电流越大, 电极表面温度越高, 金属微粒喷溅也更加剧烈, 增加了过电压持续加载阶段间隙击穿重燃的风险。另一方面, 过电压持续作用时间内, 电极表面熔融热点处于由液态向固态转化的阶段, 在电场力的作用下, 易造成金属须生长^[23], 与粘附在电极上微粒一起构成电极表面的尖峰。对于这种短间隙分断场合, 尖峰的存在无疑将恶化间隙承受电压的能力。

对实验后的真空灭弧室进行拆解分析, 照片见图 6。分断实验失败后, 短路电流峰值不超过 20 kA, 触头经历了时长 2 ms 左右的持续燃弧。通过照片可见, 触头阴、阳极对应边缘区域存在明显的熔斑, 熔

斑占据电极 1/3 的面积, 触头表面熔斑外的其他区域无明显的燃弧迹象。阴极左侧烧蚀较为严重, 触头表面存在明显的熔融金属向外喷出的痕迹, 熔融液滴凝固后形成的金属颗粒清晰可见。虽然实验中开断失败后, 触头经历的燃弧过程对电流过零时电极状态有一定的破坏, 但从电极表面烧蚀痕迹的分布情况, 依旧可以推断出换流电流投入时电弧为集聚态, 电极表面电弧引燃处存在熔融区。阴极及屏蔽罩表面的喷溅现象证明了大电流下间隙中不可避免地存在大量金属微粒, 进而影响着弧后间隙的介质强度。



图 6 触头照片(左侧为阴极、右侧为阳极)

Fig. 6 Photo of contacts (cathode left and anode right)

4 结语

燃弧过程及弧后金属微粒的产生、运动特性、温度特征等主要决定于所选用的触头材料及其冶金学特性。根据上述实验结果可知, 采用 CuCr50 材料的平板型触头, 实验条件下的极限分断能力不超过 20 kA。在触头材料研究未取得突破的背景下, 为尽可能地提升短燃弧、短间隙条件下真空开关强迫换流分断大电流的能力, 避免延迟击穿的发生, 需努力降低单个弧柱的功率密度, 改善电极的热状态。为此, 开发专用真空开关, 通过触头结构和驱动机构的合理设计, 使开关分离拉燃电弧时形成双柱乃至多柱电弧成为可探索的方法。

参考文献:

- [1] 董恩源, 丛吉远, 邹积岩, 等. 1 500 V 船用新型直流断路器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 153-156.
DONG Enyuan, CONG Jiyuan, ZOU Jiyuan, et al. Study of 1 500 V new type DC circuit breaker used in ship[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 153-156.
- [2] ALFEROV D, BUDOVSKY A, EVSIN D, et al. DC vacuum circuit-breaker[C]//Proceedings of the 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Bucharest, Romenia: IEEE, 2008: 173-176.
- [3] NIWA Y, YOKOKURA K, MATSUZAKI J. Fundamental investigation and application of high speed VCB for DC power system of railway[C]//Proceedings of the 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Braunschweig, Germany: IEEE, 2010: 125-128.
- [4] SHI Z, JIA S, MA M, et al. Investigation on DC interruption based on artificial current zero of vacuum switch[C]//Proceedings of the 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Braunschweig, Germany: IEEE, 2010: 158-161.
- [5] NOVELLO L, BALDO F, FERRO A, et al. Development and testing of a 10 kA hybrid mechanical-static dc circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(6): 3621-3627.
- [6] 荣命哲, 杨飞, 吴翊, 等. 综述: 直流断路器电弧研究的新进展[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 35-43.
RONG Mingzhe, YANG Fei, WU Yi, et al. Review: New developments in switching arc research in DC circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 35-43.
- [7] 江道灼, 张弛, 郑欢, 等. 一种限流式混合直流断路器方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 65-71.
JIANG Daozhuo, ZHANG Chi, ZHENG Huan, et al. A scheme for current limiting hybrid DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 65-71.
- [8] 马伟明, 胡安, 袁立军. 十二相同步发电机整流系统直流侧突然短路的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 31-36.
MA Weiming, HU An, YUAN Lijun. Sudden DC-side short circuit of a 12-phase synchronous generator-rectifier system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 31-36.
- [9] 付立军, 陈波, 叶志浩. 直流网状网络短路电流计算[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1731-1736.
FU Lijun, CHEN Bo, YE Zhihao. Short-circuit current calculation for DC meshy network[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1731-1736.
- [10] IEC 60850—2007 Railway applications—supply voltages of traction systems[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2007.
- [11] 江壮贤, 庄劲武, 刘路辉, 等. 基于强迫换流原理的新型真空直流限流断路器[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(3): 20-25.
JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, LIU Luhui, et al. On new DC vacuum circuit breaker based on artificial current zero[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2012, 24(3): 20-25.
- [12] 刘路辉, 庄劲武, 王晨, 等. 小间隙下混合型直流真空断路器的分断特性[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5991-5997.
LIU Luhui, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Interruption characteristics of hybrid dc vacuum circuit breaker

- under small contact gaps[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(33):5991-5997.
- [13] 江壮贤,庄劲武,王晨,等.新型强迫换流型限流断路器真空介质强度的恢复特性[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13):152-158.
- JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Vacuum dielectric recovery characteristics of a novel current limiting circuit breaker base on artificial current zero [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13):152-158.
- [14] 徐国顺,江壮贤,庄劲武,等.新型真空直流限流断路器设计及其介质恢复特性[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 171-177.
- XU Guoshun, JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, et al. A new DC vacuum current limiting circuit breaker and its dielectric recovery characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2):171-177.
- [15] 刘路辉,庄劲武,江壮贤,等.混合型直流真空断路器触头技术—现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21):3504-3511.
- LIU Luhui, ZHUANG Jinwu, JIANG Zhuangxian, et al. Present situation and prospect of contacts of hybrid dc vacuum circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21):3504-3511.
- [16] 江壮贤,庄劲武,王晨,等.基于电磁斥力原理的高速触头机构仿真分析与设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8):172-177.
- JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Simulation analysis and design of a high speed contact mechanism based on electro-magnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8):172-177.
- [17] 邹积岩,程礼椿,秦红三.真空开关介质强度恢复的研究[J]. 华中理工大学学报(自然科学版), 1990, 18(4):9-14.
- ZOU Jiyang, CHENG Lichun, QIN Hongsan. An investigation on dielectric strength recovery of a vacuum switch[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 1990, 18(4):9-14.
- [18] 刘路辉,庄劲武.平板触头直流真空电弧形态演化与电压特性[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6):934-940.
- LIU Luhui, ZHUANG Jinwu. Modes of drawn DC vacuum arcs and characteristics of arc voltage between butt contacts[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6):934-940.
- [19] SCHULMAN M, SLADE P. Sequential modes of drawn vacuum arc between butt contacts for currents in the range 1 kA to 16 kA[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 1995, 18(2):417-422.
- [20] LIU L, ZHUANG J, XU G, et al. The characteristics of vacuum arc in the process of DC interruption using butt contacts and TMF contacts[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(6):1736-1741.
- [21] GELLERT B, SCHADE E, DULLNI E. Measurement of particles and vapor density after high-current vacuum arcs by laser techniques[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1987, 15(5):545-551.
- [22] ZALUCKI Z. Estimation of post-arc neutral vapor density in the gap volume generated by evaporating macroparticles in a diffuse vacuum arc[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1985, 13(5):321-326.
- [23] DAVIES D, BIONDI M. Mechanism of DC electrical breakdown between extended electrodes in vacuum [J]. Journal of the Applied Physics, 1971, 42(8):3089-3107.
- 张超(1979—),男,博士,讲师,主要从事电力系统安全运行与保护。
- 刘路辉(1986—),男,讲师,主要研究方向为舰船电力系统保护策略与技术。