

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.011

±800 kV 直流高速开关(HSS)直流电弧烧蚀试验研究

张长虹¹, 吕金壮¹, 夏谷林¹, 谭盛武², 龙启¹, 孙珂珂², 彭茂兰¹,
李一帆³, 卢文浩¹, 侯明春¹, 黄瑜珑³, 刘英英⁴, 彭翔¹

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司, 广州 510663; 2. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467000; 3. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 4. 河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467000)

摘要: 直流高速开关 HSS 是多端直流输电系统中的关键设备, 需要具有耐受长时间直流电弧烧蚀能力。文中根据±800 kV 混合多端高压直流输电工程中直流高速开关 HSS 的运行工况和产品特点, 提出了一种 HSS 长时间直流电弧烧蚀试验的开关电源恒流方法, 设计了开关电源恒流的直流大电流试验电路。文中介绍了试验电路中主要设备的技术参数和器件选型, 并基于大功率电力电子开关器件 IGBT, 搭建了试验回路, 进行了 HSS 长时间直流电弧的烧蚀试验。样机的烧蚀试验结果表明, 文中所提出的试验方法是可行的。基于试验结果, 提出了 800 kV 等级 HSS 产品的喷口和弧触头材料选型建议。

关键词: 直流高速开关(HSS); 直流电弧烧蚀; 样机试验; 混合多端直流输电工程; 开关电源恒流法

Research on DC Arc Ablation Test of ±800 kV DC High Speed Switch(HSS)

ZHANG Changhong¹, LYU Jinzhuang¹, XIA Gulin¹, TAN Shengwu², LONG Qi¹, SUN Keke²,
PENG Maolan¹, LI Yifang³, LU Wenhao¹, HOU Mingchun¹, HUANG Yulong³,
LIU Yingying⁴, PENG Xiang¹

(1. EHV Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467000, China; 3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467000, China)

Abstract: DC high speed switch (HSS) is a key component in multi-terminal DC transmission system and is required to withstand long-duration DC arc ablation. According to the operating conditions and product characteristics of HSS in ± 800 kV hybrid multi-terminal HVDC transmission project, in this paper a constant current method of switching power supply for HSS long-term DC arc ablation test is proposed, and a constant current DC high current test circuit of switching power supply is designed. The technical parameters and device selection of the main equipment of the test circuit are also introduced. Based on the high-power power electronic switching device IGBT, the test circuit is set up and the HSS long-term DC arc ablation test is performed. The ablation test results of the prototype show that the test method proposed in this paper is feasible. Based on the test results, the selection of material type of nozzle and arc contact for 800 kV HSS products is proposed.

Key words: DC high speed switch (HSS); DC arc ablation; prototype test; multi-terminal HVDC transmission project; constant current method of switching power supply

0 引言

由于中国西电东送和新能源大规模并网的工

程需要, 多端直流输电技术得以快速发展, 这也提高了对直流设备的技术要求^[1-4]。在特高压多端直流输电工程或直流电网中, 为实现故障线路区域的

快速隔离,需要安装高压直流断路器(high voltage DC circuit breaker, HV DCCB)。然而,由于直流电弧不存在过零点,故直流电流开断技术难度高,现场运行的高压直流断路器结构十分复杂。

在现有技术条件下,高压直流断路器按照拓扑结构可以分为3类^[5-8]:固态式直流断路器、机械式直流断路器、混合式直流断路器。机械式直流断路器具有导通损耗低、开断能力强、成本低等优点。固态式直流断路器具有超快速开断等优点。混合式直流断路器结合了机械式直流断路器与固态式直流断路器的优点,利用机械开关导通正常负荷电流,电力电子开关关断故障电流,在保证开断容量、动作速度的前提下大大降低了断路器的通态损耗。

在张北±500 kV 特高压柔性直流电网工程运行的535 kV 高压直流断路器 DCCB 安装在±500 kV 的线路上,能在3 ms内快速抑制故障电流实现故障线路隔离,隔离故障过程中,各个换流站不需要降压操作,提高了电网的供电质量。张北±500 kV 柔性直流电网中运行的混合式直流断路器见图1,主要技术参数见表1。



图1 张北工程中535 kV 混合式直流断路器

Fig. 1 535 kV hybrid DCCB in Zhangbei project

表1 535 kV 混合式直流断路器主要技术参数

Table 1 Technical parameters of 535 kV hybrid DCCB

参数	要求值
额定直流电压/kV	535
额定直流电流/A	3 000
最大连续直流电流/A	3 300
额定开断电流/kA	25
开断动作时间/ms	≤3
MOV 最大吸收能量/MJ	> 150(含 20%热备用)
残压(瞬态开断电压峰值)/kV	< 800
25 kA 故障电流开断次数	≥200

图1所示的直流断路器中,由于使用了大量的大功率电力电子器件、大容量MOV吸能装置和复杂的运行状态检测及操作控制单元,导致混合式高压直流断路器具有结构复杂、运行维修难、体积大和

成本高的问题。

在目前的特高压混合三端直流输电工程中,通过设计系统的运行控制策略,只需要起隔离故障的高速机械开关(high speed switch, HSS)在不具备产生人工电流过零点功能条件下,开断几十 A 的线路电流。在 HSS 开断直流电流时,相关换流站已闭锁,这时线路上的电压为1 kV 左右^[9-16]。

相较混合式高压直流断路器 HV DCCB 和常规直流输电工程中的机械式直流转换开关(HV DC transfer switch, HV DCTS),HSS 的结构简单,经济性能好。多端直流工程中运行的800 kV 高速机械开关 HSS 产品见图2,主要技术参数见表2。



图2 多端柔直工程中运行的800 kV 高速机械开关 HSS

Fig. 2 Operating in multi-terminal flexible DC project of 800 kV high speed switch(HSS)

表2 800 kV 高速机械开关 HSS 主要技术参数

Table 2 Technical parameters of 800 kV HSS

参数	要求值
额定直流电压/kV	816
额定连续运行直流电流/A	4 000
额定开断电流	35 A/1 kV/正负各10次
燃弧耐受能力	4 000 A/400 ms/5 次
开断动作时间/ms	≤50
直流耐压(端对地、端间)	1 224 kV/1 h

根据目前多端直流输电工程的运行特性,要求 HSS 具有开断小直流电流的同时,还能够承受燃弧时间为400 ms 的4 000 A 电弧烧蚀,烧蚀次数不少于5次^[16-17],灭弧室不能发生爆裂或密封失效。

1 HSS 的电弧烧蚀试验方法

对于高压交流机械开关的电弧烧蚀试验,国内外已有成熟的试验方法和规范,开关电器的试验站和一些研究单位实验室都可以开展进行。对于高压直流机械开关的电弧烧蚀试验,特别是对于 HSS 的4 000 A/400 ms 直流电弧烧蚀,国内还没有形成试验的标准和规范,由于烧蚀过程的功率大,国内外的大学实验室和研究单位还没有进行过研究试验。

在电弧烧蚀情况下, 高压断路器触头烧蚀的机制包括蒸发和喷溅两种^[18-22], 影响触头烧蚀的因素主要有电弧电流、触头材料、燃弧时间、开断速度、电极间隙、电弧形状等, 现在研究方法有建模计算和样机试验, 由于灭弧室的结构复杂, 影响触头烧蚀的因素有很多, 建立直流电流电弧条件下和实际样机等效的触头烧蚀模型研究触头烧蚀特性仍然是一个难题。文中提出了一种 HSS 灭弧室直流 4 000 A 长时间的直流电流烧蚀方法, 基于大功率电力电阻器件实现了试验电路, 对 HSS 样机进行燃弧烧蚀试验, 研究了在不同触头材料条件下, HSS 长时间的燃弧烧蚀性能, 为 HSS 的产品灭弧室的设计提供了依据。

目前, 国内开关电器试验站和大学实验室在开展高压直流开关设备电流开断和电弧烧蚀的试验的方法主要有交流整流法^[23-25]、低频电流法^[26-33]、合成试验法^[24, 29]和直流工程的现场试验^[34-35]。

1.1 交流整流法直流烧蚀试验电流

进行断路器短路电流电弧烧蚀性能试验时, 如果所需要的试验容量大, 可由冲击发电机作为试验电源, 而对于试验电流比较小、试验容量低的试验, 可从交流电网获取试验电源, 试验回路原理图见图 3。由变压器连接 AC/DC 整流装置输出直流电流, 试验回路串联一个平波电抗器 L , 通过调节电源电压控制输出电流, 以保证试验过程直流电源输出的电流幅值为期望值。

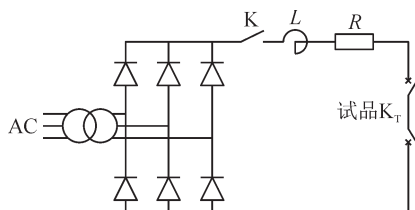


图3 交流整流试验电路

Fig. 3 AC rectifier test circuit

用图 3 所示的交流整流试验电路进行 HSS 的 4 000 A/400 ms 的烧蚀试验时, HSS 的电弧稳态电压为 1 kV 左右^[7], 峰值电弧电压为 8 kV 左右, 400 ms 时间内功率大于 4 MW, 电源的负荷大, 一般大学和研究所的实验室交流电源无法满足试验要求, 适合在大型的试验站进行。

1.2 低频电流法直流烧蚀试验电流

低频电流法是采用低频的交流电流, 例如 $f=4$ Hz, 代替直流电流进行直流开关设备的试验方法。低频交流可由 LC 振荡回路产生, 试验回路原理图见图 4。

在进行试验前, 由直流电源通过小电流给电容器 C 充电至计算值。进行试验时, K 合闸, 通过电抗 L 、

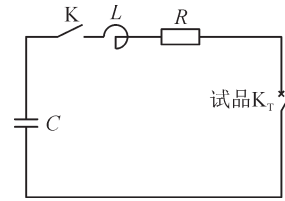


图4 LC振荡回路试验电路

Fig. 4 LC oscillation circuit test circuit

试验样品 K_T 放电, 形成低频的电流, 取电流峰值的区间作为试验样品 K_T 的燃弧时间段。由于电容器放电引起电容器电压的变化和燃弧期间弧压的变化, 使得试验电流也发生较大的变化, 与恒定的直流差别较大。这种试验电路适合进行短路电流的开断试验和进行几十 ms 时间的燃弧烧蚀试验, 很难满足 HSS 几百 ms 的长时间燃弧烧蚀试验的要求。

1.3 开关恒流法直流烧蚀试验电流

针对 HSS 的 4 000 A/400 ms 长时间直流电弧烧蚀试验的需求, 文中提出一种应用大功率电力电子器件实现长时间恒流的试验方法, 试验回路原理图见图 5。

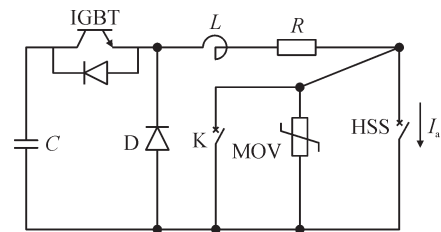


图5 大功率开关电源恒流试验电路

Fig. 5 Constant current test circuit of switching power supply

图 5 中: HSS 是烧蚀试验样品; C 为电容器组, IGBT 为大功率电力电子开关组件; D 为续流二极管组件; L 为电抗器; R 为电路等效电阻; MOV 为避雷器, 防止试验过程中回路出现过电压; K 是一台高压机械开关, 在每次烧蚀试验的规定时刻合闸, 以控制 HSS 的燃弧时间; I_a 为试验电流。

开关恒流法进行 HSS 烧蚀试验的工作原理和过程如下:

1) 在进行试验前, 由直流电源通过小电流给电容器 C 充电至计算值。试验开始前试验样品 HSS 是合闸状态, 在试验开始后, 通过 IGBT 组件的导通, 电容器 C 向电抗器 L 和试验样品 HSS 回路放电。电流上升到期望值后, 通过 IGBT 组件的导通和关断控制, 保持通过 HSS 样品的电流 I_a 在一个期望的电流值范围内。当电流超过设定最大值 I_{max} 时, IGBT 组件关断, I_a 通过二极管组件 D 续流, 由于回路中有电阻 R , 电流会下降。当 I_a 小于设定值 I_{min} 时, IGBT 组

件再次导通,电容器 C 输出能量, I_a 再上升。通过调节 I_{\max} 、 I_{\min} 的差值在可以接受的范围内,维持 I_a 在期望的试验电流值。在实际试验中, I_{\max} 、 I_{\min} 的差值如果太小,就会增加IGBT的开关次数,这会增加IGBT结温,所以需要把调节 I_{\max} 、 I_{\min} 的差值在一个合理的数值。例如,通过控制IGBT开关的导通和关断的控制时序,使得试验电流 I_a 的波动小于2%。

2)在HSS试验样机进行分闸操作中,动静触头分离后,触头间产生电弧,动静触头间产生了电弧电压 U_a 。当电弧电压 U_a 小于电容器 C 的电压 U_c 时,试验电流 I_a 通过IGBT的控制继续保持在设定的 I_{\max} 、 I_{\min} 之间。

3)在HSS的分闸过程结束前,由于动静触头间的开距不断增加,电弧电压也跟随增加。当动触头分闸到分闸位置后,灭弧室的吹弧作用结束,灭弧室内部温度升高,电弧电压会下降,电弧电压有一个最大值。在HSS的长时间电弧烧蚀过程中,为了保持试验电流 I_a 维持在期望的数值范围内,电容器 C 的电压需要保持高于电弧电压。

4)如果选用800 kV的HSS原型产品作为烧蚀试验样机,4 000 A烧蚀试验过程中电弧电压的最大值预计为8 kV左右^[17],在这个时刻电容器 C 的电压需要在8 kV以上,由于在达到最大弧压前电容器 C 已经进行了几十ms的放电,所以试验前电容器 C 的充电需要大于8 kV。文[17]是关于500 kV等级的HSS烧蚀试验,对于800 kV的HSS,如果灭弧室开距更长,试验过程的电弧电压应该更高一些。

5)HSS分闸操作过程需要几十ms时间,在灭弧室完成分闸操作动触头达到分闸位置后,4 000 A烧蚀试验的电弧电压稳定在1 kV左右,这时的烧蚀功率约为4 MW,需要维持350 ms以上。如果选用800 kV的HSS原型产品作为烧蚀试验样机,需要选用大容量的电容器 C ,IGBT组件和续流二极管 D 组件的工作电压需要根据电容器 C 的充电电压来设计。对于4 000 A、400 ms的HSS烧蚀试验,总的试验能量为2 MJ左右,如果电容器为40 mF的容值,充电电压为10 kV,IGBT组件和续流二极管 D 组件需要多个器件串、并联组成。

1.4 交流烧蚀试验电路

对于HSS的4 000 A交流电弧烧蚀试验,若一次完成400 ms/4 000 A的烧蚀,一般的实验室的电源也满足不了要求,适合在大功率的开关电器试验站中进行。如果选用多次烧蚀的试验方法,以累计烧蚀时间达到总烧蚀时间的要求,也可以在大学和研究所的实验室开展进行。

为了研究HSS的耐烧蚀性能和比较HSS在直流和交流电弧烧蚀下的性能差异,文中设计了一种交流烧蚀试验的电路,见图6。

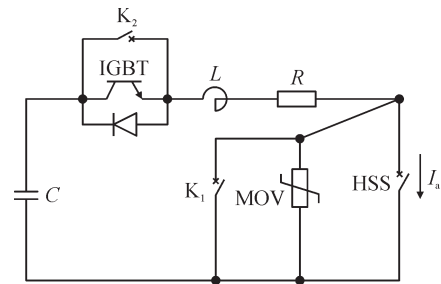


图6 交流烧蚀试验电路

Fig. 6 AC ablation test circuit

图6中:HSS是烧蚀试验样机; C 为电容器组;IGBT为大功率电力电子开关组件; L 为电抗器; R 为试验回路寄生电阻;MOV为避雷器,防止试验过程中试验回路产生过电压; I_a 为试验电流; K_1 是一台高压机械开关,在每次交流烧蚀试验完成后的规定时刻合闸,为 C 放电; K_2 是一台高压机械开关,通过时序控制,在IGBT组件导通后几个ms后合闸,以旁路IGBT防止IGBT通流时间过长发热损坏。用IGBT合闸是为了克服机械开关 K_2 每次合闸时间的分散性,保证试验开始后导通电容器 C 的放电回路产生的交流电流起始时间的稳定,使得HSS每次试验的电弧烧蚀时间稳定。

通过控制电容器 C 的预先充电电压,可以控制烧蚀试验的电流有效值,由于试验回路中有寄生电阻 R 存在,使得试验电流衰减,不能输出长时间的稳定电流。对于交流烧蚀,还存在电流过零试品开关断口熄弧问题,需要采用过零延弧装置实现长燃弧烧蚀。如果不用过零延弧技术,可以进行电流正半波和负半波的交流电流烧蚀试验,通过控制电弧电流的有效值和燃弧时间,通过多次试验的累计达到等效的烧蚀效果。

2 恒流烧蚀试验主要设备

文中以图5所示的开关恒流电路进行HSS的烧蚀试验,主要设备有:HSS烧蚀试验样机、电容器 C 、电力电子开关IGBT组件、续流二极管组件 D 、电流电压测试设备。

800 kV的HSS产品灭弧室样机见图7。由于需要耐受800 kV多端直流系统的相应电压,所以设计为两个灭弧室串联。为了保证试验的等效性,进行HSS电流开断试验时,需要用同样灭弧室结构的触头和喷口部件。

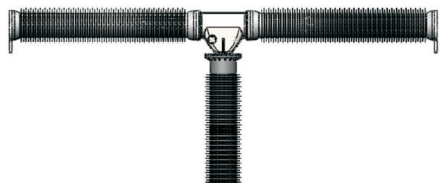


图7 800 kV 的HSS产品样机

Fig. 7 800 kV HSS product prototype

进行HSS的电弧烧蚀试验时,主要是对动静触头及相关灭弧部件进行耐烧蚀性能的测试,可以通过减小灭弧室动静触头的开距降低电弧电压,减小了试验回路的能量,使得烧蚀研究试验能够在大学或制造厂的实验室开展。文中设计的HSS烧蚀试验样机见图8。选用单断口,动静触头和喷口结构保持和原产品一样,减小了灭弧室的分闸开距。试验样机在4 000 A的电弧电流下,峰值弧压和稳态弧压都小于1 kV。

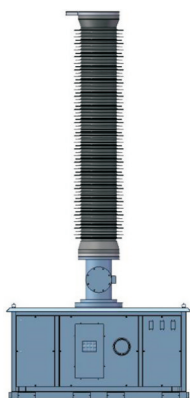


图8 HSS烧蚀试验样机

Fig. 8 HSS ablation test prototype

电力电子开关IGBT组件见图9。由于HSS烧蚀试验电流是4 000 A,文中单次试验燃弧时间为200 ms,通过计算IGBT的结温升高,文中试验中IGBT组件可以不安装水冷设备,IGBT组件的温升不超过技术参数的规定数值。文中的电容器C的充电电压不超过5 kV,IGBT组件采用8个峰值电压4 500 V、额定电流2 kA的器件2串4并组成。由于烧蚀过程中,IGBT反复多次导通和关断,所以需要安装并联RC阻容元件进行动态均压、并联直流电阻进行稳态均压和并联MOV抑制过电压。

续流二极管组件D见图10。通过评估二极管组件结温升高,试验中二极管组件也没有安装水冷装置。文中试验时,二极管组件采用12个峰值电压4 500 V、额定电流2 kA的器件,4串2并组成。

文中的试验电路中,二极管组件的电压和电流设计有较大的裕度,这是由于在图5所示的直流电弧烧蚀电路中,续流二极管组件D是试验安全的关键部件。如果在IGBT导通期间D组件击穿失效,就

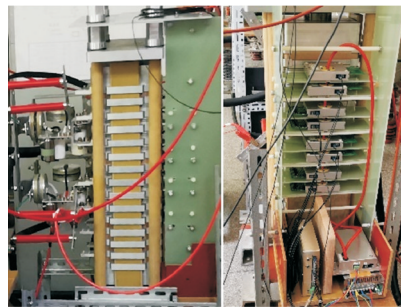


图9 电力电子IGBT组件

Fig. 9 IGBT switch assembly

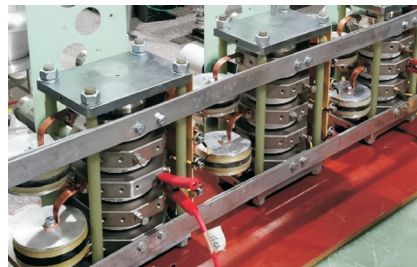


图10 二极管组件

Fig. 10 Diode assembly

发生了短路情况,电容器C将通过IGBT和续流二极管D形成短路,发生短路放电,由于回路电阻和电感非常小,短路电流上升速度极快,会发生烧毁IGBT和大电流放电事故,为了试验安全设计了较大的电流电压裕度。在正常的烧蚀试验过程中,二极管D组件多次反复导通和关断,故也需要安装并联RC阻容元件进行动态均压、并联直流电阻进行稳态均压和并联MOV抑制过电压,以保护二极管组件。此外,为保证试验设备和人员的安全,需要有过电流检测和快速关断IGBT组件的措施。

电流测量传感器见图11。由于试验过程需要测量长时间的直流电流,所以选用能测量直流的霍尔型电流传感器,试验中选用了量程为10 kA的3个霍尔型电流传感器,2个用于电流幅值的控制及保护,1个连接示波器用于试验数据记录。



图11 霍尔型电流传感器

Fig. 11 Hall current sensor

电压测量传感器选用Tektronix-P6015A 直流电压传感器,见图 12,用于测量电容器组 C 、HSS 烧蚀样机断口的电压。P6015A 的分压比是 1 000: 1,输出的信号连接数据记录仪 DL850,同时记录多个电压信号。

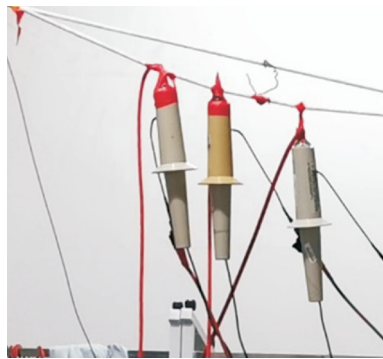


图 12 阻容电压分压器

Fig. 12 Resistance-capacitance voltage divider

操作过程控制及数据记录设备见图 13。试验过程中有 4 000 A 电流的频繁导通关断控制,瞬时的 di/dt 数值较大,实验室空间和试验电路上有较大的电磁干扰问题,所以电流测量控制单元与 IGBT 组件之间是用光纤连接传输控制信号,有利于隔离干扰,控制器等设备也需要良好的电磁屏蔽和接地,测量控制信号需要增加抗干扰滤波措施。

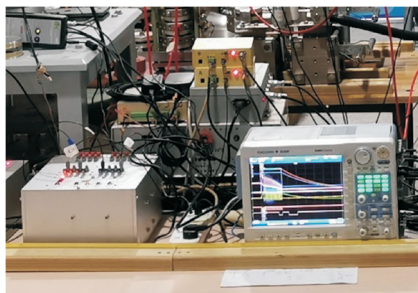


图 13 操作过程控制及数据记录设备

Fig. 13 Control and data recording equipment

3 HSS 烧蚀样机试验与数据分析

基于设计的 HSS 电弧烧蚀试验样机,文中进行了正向的 4 000 A 直流电弧烧蚀试验,还进行了反向的 4 000 A 直流电弧烧蚀试验,选用不同材料的触头和不同材料的喷口部件,进行了对比烧蚀试验。烧蚀效果的评估方法采取了试验前对烧蚀部件进行称重,烧蚀试验完成后再次称重,计算烧蚀部件电弧烧蚀引起的重量损失,以评估烧蚀的程度。

基于图 5 试验电路进行直流烧蚀试验过程中的一个试验电流测量波形图见图 14。

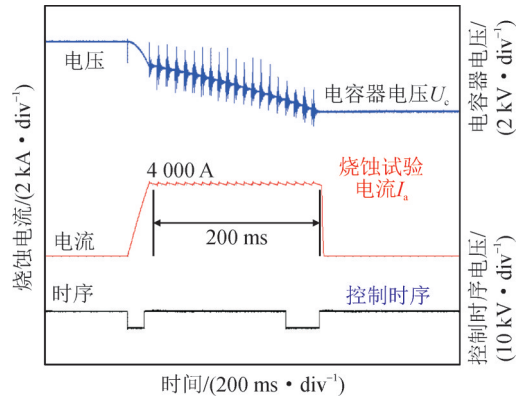


图 14 电弧烧蚀试验电流波形

Fig. 14 Arc current waveform

从图 14 的电流波形可以看出,烧蚀试验过程中,试验电流值在期望电流值范围内,不受电容器 C 电压 U_c 减小的影响。

3.1 CuW80 触头 3% 氮化硼喷口直流烧蚀试验

在充气压力 0.52 MPa 下,进行了 2 组安装 CuW80 动静弧触头和添加 3% 氮化硼喷口的 HSS 样机烧蚀试验,烧蚀电流为 4 000 A、每次燃弧烧蚀 200 ms、每个样品试验 10 次,合计 2 000 ms 的烧蚀试验,试验测量数据见表 3。

表 3 3%BN/CuW80 烧蚀试验数据

Table 3 3%BN/CuW80 ablation test data

烧蚀时间	部件	材料	烧蚀量/g
试验 1 200 ms/10 次	动弧触头	CuW80	4.0
	静弧触头	CuW80	25.0
	喷口	3%BN	9.0
试验 2 200 ms/10 次	动弧触头	CuW80	6.0
	静弧触头	CuW80	20.0
	喷口	3%BN	9.0
平均值 200 ms/10 次	动弧触头	CuW80	5.0
	静弧触头	CuW80	22.5
	喷口	3%BN	9.0

3.2 CuW70 触头 1% 氮化硼喷口直流烧蚀试验

在充气压力 0.52 MPa 下,进行了 2 组安装 CuW70 动静弧触头和添加 1% 氮化硼喷口的 HSS 样机烧蚀试验,烧蚀电流为 4 000 A、每次燃弧烧蚀 200 ms、每个样品试验 10 次,合计 2 000 ms 的烧蚀试验,试验测量数据见表 4。

3.3 CuW85 触头 5% 氮化硼喷口直流烧蚀试验

在充气压力 0.52 MPa 下,进行了 1 组安装 CuW85 动静弧触头和添加 5% 氮化硼喷口的 HSS 样机烧蚀试验,烧蚀电流为 4 000 A、每次燃弧烧蚀 200 ms、试验 10 次,合计 2 000 ms 的烧蚀试验,试验测量数据见表 5。

表4 1%BN/CuW70烧蚀试验数据

Table 4 1% BN/CuW70 ablation test data

烧蚀时间	部件	材料	烧蚀量/g
试验1 200 ms/10次	动弧触头	CuW70	7.0
	静弧触头	CuW70	17.0
	喷口	1%BN	14.0
试验2 200 ms/10次	动弧触头	CuW70	6.0
	静弧触头	CuW70	16.0
	喷口	1%BN	13.0
平均值 200 ms/10次	动弧触头	CuW70	6.5
	静弧触头	CuW70	16.5
	喷口	1%BN	13.5

表5 5%BN/CuW85烧蚀试验数据

Table 5 5% BN/CuW85 ablation test data

烧蚀时间	部件	材料	烧蚀量/g
试验1 200 ms/10次	动弧触头	CuW85	8
	静弧触头	CuW85	20
	喷口	5%BN	14

3.4 触头和喷口的直流和交流烧蚀试验

在充气压力 0.52 MPa 下,开展了 3 组安装 CuW70 动静弧触头和添加 1%氮化硼喷口的 HSS 样机烧蚀试验,进行了正向直流、反向直流和交流 4 000 A/500 ms 的烧蚀试验。直流试验中,进行了 2 次 200 ms、1 次 100 ms 的 4 000 A 电流烧蚀,总烧蚀时间为 500 ms。交流试验中,交替进行了正半波、负半波各 50 次的 4 000 A 电流烧蚀,总烧蚀时间为 500 ms。试验测量的数据见表 6。

表6 1%BN/CuW70 直流交流烧蚀试验数据

Table 6 1% BN/CuW70 DC and AC ablation test data

烧蚀时间/ms	部件	材料	烧蚀量/g
试验1正向 直流500	动弧触头	CuW70	1.0
	静弧触头	CuW70	3.0
	喷口	1%BN	3.0
试验2反向 直流500	动弧触头	CuW70	4.0
	静弧触头	CuW70	3.0
	喷口	1%BN	3.0
试验3交 流500	动弧触头	CuW70	1.0
	静弧触头	CuW70	2.0
	喷口	1%BN	0.5

3.5 烧蚀试验测量数据分析

烧蚀试验的触头样品见图 15。对比分析表 3-5 的试验测量数据,可以看出:CuW70 触头 1%氮化硼喷口、CuW80 触头 3%氮化硼喷口、CuW85 触头 5%氮化硼喷口的 3 组样机在烧蚀试验中都有不同的烧蚀,总体烧蚀量不大,均可以满足 4 000 A、10 次、200 ms 的燃弧耐受,等效于 4 000 A、5 次、400 ms 的长时燃弧耐受工况。



图15 通过烧蚀试验的触头和喷口部件

Fig. 15 Contacts and nozzles passing ablation test

不同材料动触头、静触头和喷口的烧蚀数据对比见图 16-18。结果表明,CuW70 静弧触头、CuW80 动弧触头及添加 3%氮化硼喷口耐烧蚀性能优于其余两组,但是烧蚀量相差不大。

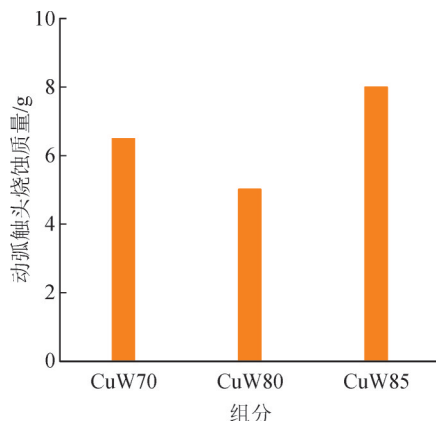


图16 Cu70/80/85 动触头直流烧蚀量

Fig. 16 DC ablation of moving contact of Cu70/80/85

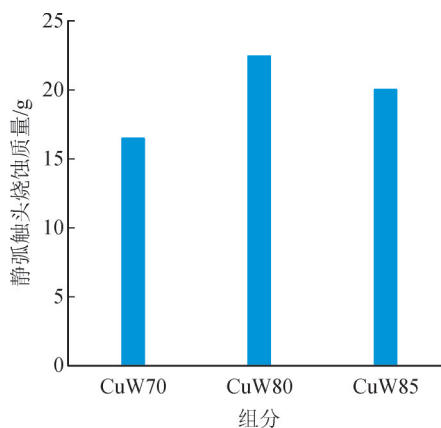


图17 Cu70/80/85 静触头直流烧蚀量

Fig. 17 DC ablation of static contact of Cu70/80/85

不同材料动触头、静触头和喷口正向直流、反向直流和交流的烧蚀数据对比见图 19-21。结果表明 4 000 A 直流电流方向对单个灭弧室的触头和喷口烧蚀影响不大,4 000 A 直流电流和交流电流对单个灭弧室触头和喷口烧蚀效果基本一样。传统的认识直流电弧比交流电弧的烧蚀结果严重,是发生直流短路事故时,由于直流电弧熄灭困难,燃弧时

间长,导致了电弧烧蚀结果更严重。

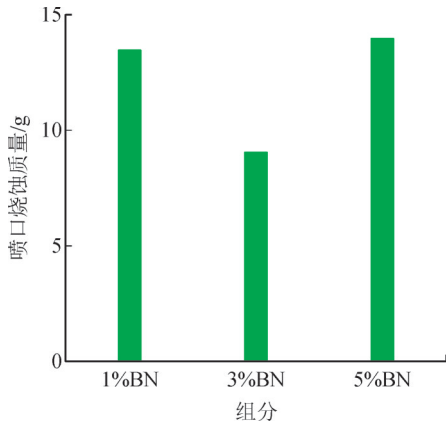


图18 1/3/5%氮化硼喷嘴直流烧蚀量

Fig. 18 DC ablation of 1/3/5% boron nitride nozzle

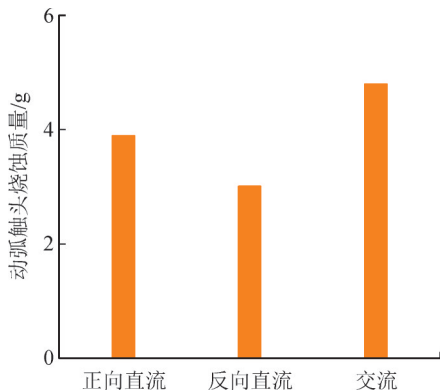


图19 动触头直流正、反向和交流烧蚀量

Fig. 19 DC and AC ablation of moving contact

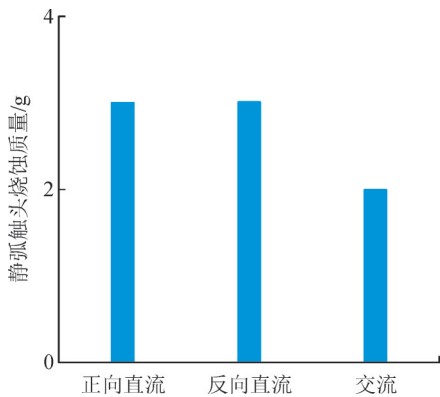


图20 静触头直流正、反向和交流烧蚀量

Fig. 20 DC and AC ablation of static contact

文中开展HSS的4 000 A电流电弧烧蚀试验,表现出动静触头和喷嘴均为局部烧蚀,没有出现大面积破坏性烧蚀,说明文中设计的HSS试验试验样机和动静触头及喷嘴部件的电弧烧蚀耐受能力能满足技术指标的要求,还有较大的裕度。在后续的产品设计中,可以适度减小动静触头的尺寸。

烧蚀试验后,触头喷嘴组件上附着一定量烧蚀的残留物,影响了烧蚀量测量数据的准确性,见图22。烧蚀量的测量中,需要对触头和喷嘴部件进行清洁

措施,以提高烧蚀试验数据的有效性。

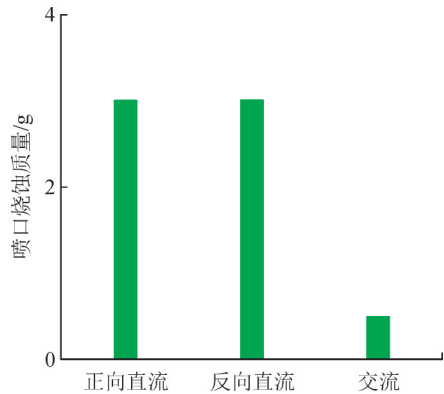


图21 1%氮化硼喷嘴直流正、反向和交流烧蚀量

Fig. 21 DC and AC ablation of 1% boron nitride nozzle



图22 触头烧蚀后的残留物

Fig. 22 Residues after contact erosion

根据文中的直流电弧烧蚀试验研究结果,静弧触头采用CuW70、动弧触头采用CuW80和喷嘴氮添加化硼含量采用3%的组合耐受电弧烧蚀能力最优,因此建议800 kV等级HSS产品的喷嘴和弧触头定型材料见表7。

表7 800 kV HSS喷嘴和弧触头定型材料

Table 7 800 kV HSS nozzle and arc contact sizing material

直流电弧 I/A	烧蚀时间 t/ms	喷嘴 BN/%	静弧触头 W/%	动弧触头 W/%
4 000	400	3	70	80

4 结论

文中根据±800 kV混合多端高压直流输电工程中直流高速开关(HSS)的运行工况和产品特点,设计了一种HSS直流4 000 A长时间直流电弧烧蚀试验的开关电源恒流方法。基于大功率电力电子器件,搭建了直流4 000 A恒流输出的燃弧耐受试验回路,能够输出长时间的直流试验电流。烧蚀试验过程中,试验电流稳定在设计电流值范围内,不受试验电源和HSS断口电弧电压变化的影响。

基于HSS烧蚀试验样机,进行了不同触头喷嘴材料样机的4 000 A直流烧蚀试验,对比了正向直流电流、反向直流电流及交流电流的烧蚀效果,试验结果表明:

- 1)文中基于CuW70触头1%氮化硼喷嘴、

CuW80 触头 3%氮化硼喷口和 CuW85 触头 5%氮化硼喷口设计的烧蚀样机均可以满足 4 000 A/5 次/400 ms 的长时间燃弧耐受工况, 相关组件的电寿命有较大的裕度。

2)在同样的烧蚀时间条件下, 4 000 A 直流电流的方向对文中设计的 HSS 试验样机灭弧室的触头和喷口烧蚀效果影响不大。

3)在同样的烧蚀时间条件下, 4 000 A 直流电流和交流电流对文中设计的 HSS 试验样机灭弧室的触头和喷口烧蚀效果基本一样。

参考文献:

- [1] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9):174-187.
LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9):174-187.
- [2] 张智, 徐永海, 张世聪, 等. 直流配电网电能质量指标研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3):172-187.
ZHANG Zhi, XU Yonghai, ZHANG Shicong, et al. Review of power quality indices of a DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3):172-187.
- [3] 张东进, 何柏娜, 程婷, 等. 基于振荡回路的光伏直流断路器拓扑结构设计[J]. 供用电, 2024, 41(6):97-107.
ZHANG Dongjin, HE Baina, CHENG Ting, et al. Topology design of photovoltaic DC circuit breaker based on oscillation circuit[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(6):97-107.
- [4] 郗鑫, 文韬, 韩彬, 等. 考虑变电站内接线和拓扑瞬态调整的断路器短路电流分析[J]. 电力建设, 2024, 45(7):113-121.
QIE Xin, WEN Tao, HAN Bin, et al. Analysis of short-circuit current of circuit breakers considering substation wiring and topology transient adjustment[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(7):113-121.
- [5] 汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北 500 kV 直流电网关键技术与设备研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(7):2097-2106.
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7):2097-2106.
- [6] 余占清, 曾嵘, 屈鲁, 等. 混合式直流断路器的发展现状及展望[J]. 高电压技术, 2020, 46(8):2617-2626.
YU Zhanqing, ZENG Rong, QU Lu, et al. Development status and prospect of hybrid DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8):2617-2626.
- [7] 张翔宇, 余占清, 黄瑜珑, 等. 500 kV 耦合负压换流型混合式直流断路器原理与研制[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4):413-422.
ZHANG Xiangyu, YU Zhanqing, HUANG Yulong, et al. Principle and development of 500 kV hybrid DC circuit breaker based on coupled negative voltage commutation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4):413-422.
- [8] 何俊佳. 高压直流断路器关键技术研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(8):2353-2361.
HE Junjia. Research on key technologies of high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8):2353-2361.
- [9] CAO Runbin, LI Guiyuan, LI Yan, et al. Multi-terminal hybrid UHVDC line protection scheme[C]//8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019). Shanghai: IET, 2019: 1-6.
- [10] 肖亮, 王国腾, 徐雨哲, 等. LCC-MMC 混合多端直流输电系统的潮流计算和机电暂态建模方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(8):2578-2586.
XIAO Liang, WANG Guoteng, XU Yuzhe, et al. Methods for power flow calculation and electro-mechanical transient modeling of LCC-MMC hybrid multi-terminal HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8):2578-2586.
- [11] 何平港, 牟大林, 林圣. LCC-MMC 混合级联型直流输电系统启动控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22):71-80.
HE Pinggang, MU Dalin, LIN Sheng. Start-up control strategy for an LCC-MMC hybrid cascade HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22):71-80.
- [12] 陈争光, 周泽昕, 王兴国, 等. 混合多端直流输电系统线路保护方案研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7):2617-2622.
CHEN Zhengguang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. Research on protection scheme of hybrid multi-terminal DC transmission lines[J]. Power System Technology, 2019, 43(7):2617-2622.
- [13] 王蕾, 孙孝峰, 王宝诚, 等. LCC-MMC 混合高压直流输电系统直流线路故障保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21):7339-7351.
WANG Lei, SUN Xiaofeng, WANG Baocheng, et al. Research on protection scheme of DC line fault in LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21):7339-7351.
- [14] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲, 等. 混合多端直流输电线路快速保护及自适应重启方法实用化研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11):3873-3884.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou, et al. Application research on fast line protection and adaptive restarting methods for multi-terminal hybrid LCC/MMC HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11):3873-3884.
- [15] 周登波, 陆启凡, 周勇, 等. 昆柳龙三端直流系统故障后断路器动作特性[J]. 南方电网技术, 2022, 16(2):34-40.
ZHOU Dengbo, LU Qifan, ZHOU Yong, et al. Action characteristics of circuit breakers after the faults of kunliulong three-terminal DC system[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(2):34-40.
- [16] ZHANG Chenyang, LYU Jun, LI Wei, et al. Review on key technologies of DC high speed switch in a multi-terminal UHVDC system [C]//2021 Annual Meeting of CSEE Study Committee of HVDC and Power Electronics (HVDC 2021). China: IET, 2022: 195-201.
- [17] 黎卫国, 杨旭, 张长虹, 等. 多端直流输电工程直流高速开关直流燃弧特性试验分析[J]. 高压电器, 2021, 57(8):17-22.
LI Weiguo, YANG Xu, ZHANG Changhong, et al. Analysis on DC arcing characteristics test of DC high speed switch in multi-terminal HVDC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(8):17-22.
- [18] 张长虹, 杨旭, 黎卫国, 等. 断路器开断短路电流累积烧蚀效应研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2):53-61.
ZHANG Changhong, YANG Xu, LI Weiguo, et al. Study on

- cumulative ablation effect of circuit breaker due to breaking short-circuit current[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2):53-61.
- [19] 李兴文, 吕启深, 田甜, 等. 直流空气电弧作用下触头烧蚀特性[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1970-1977.
LI Xingwen, LYU Qishen, TIAN Tian, et al. Contact erosion characteristics under direct current air arc[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1970-1977.
- [20] SUN Ming, WANG Qiping, LINDMAYER M. The model of interaction between arc and Ag₂O contact materials[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A, 1994, 17(3): 490-494.
- [21] SHEA J J. High current AC break arc contact erosion[C]//2008 Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. USA: IEEE, 2008: 22-46.
- [22] 王新刚, 张怀龙, 时斌, 等. 显微组织对WCu触头材料电弧特性及抗烧蚀性能的影响[J]. 稀有金属, 2014, 38(3): 371-378.
WANG Xingang, ZHANG Huailong, SHI Bin, et al. Arc characteristic and ablation resistance of WCu electrical contact material with different microstructure[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(3): 371-378.
- [23] 刘平, 刘朴, 姚斯立, 等. 柔直工程500 kV机械式直流断路器容量试验[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 221-226.
LIU Ping, LIU Pu, YAO Sili, et al. Capacity test of 500 kV mechanical DC circuit breaker of flexible DC project[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 221-226.
- [24] 陈名, 徐敏, 黎小林, 等. 高压直流断路器开断试验方法综述[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 37-43.
CHEN Ming, XU Min, LI Xiaolin, et al. Review of HVDC circuit breaker breaking test method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 37-43.
- [25] 班建, 高享想, 黄实, 等. 直流断路器电流开断试验技术与试验回路[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 167-172.
BAN Jian, GAO Xiangxiang, HUANG Shi, et al. Current breaking test technology and circuit of DC circuit-breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 167-172.
- [26] 那虎, 丁正平, 孙晋峰, 等. 高压直流输电用直流转换开关转换电流试验回路的分析与设计(1)[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 75-81.
NA Hu, DING Zhengping, SUN Jinfeng, et al. Design of test circuits of DC circuit breaker for high voltage direct current(HVDC) distribution system- I [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 75-81.
- [27] 那虎, 丁正平, 孙晋峰, 等. 高压直流输电用直流转换开关转换电流试验回路的分析与设计(2)[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 92-95.
NA Hu, DING Zhengping, SUN Jinfeng, et al. Design of test circuits of DC circuit breaker for high voltage direct current(HVDC) distribution system- II [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 92-95.
- [28] 高俊珍, 淡淑恒, 顾崑, 等. 机械式高压直流断路器开断性能试验研究[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 111-115.
GAO Junzhen, DAN Shuheng, GU Wei, et al. Experiment research on breaking capability of mechanical type HVDC circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 111-115.
- [29] 胡斌斌, 刘黎明, 袁召, 等. 一种适用于机械式高压直流断路器的合成试验回路[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2480-2485.
HU Binbin, LIU Liming, YUAN Zhao, et al. Synthetic test circuit for mechanical HVDC circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2480-2485.
- [30] 刘晨阳, 王青龙, 柴卫强, 等. 应用于张北四端柔直工程±535 kV混合式直流断路器样机研制及试验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3638-3646.
LIU Chenyang, WANG Qinglong, CHAI Weiqiang, et al. Development and experimental research of ±535 kV hybrid DC circuit breaker prototype applied in Zhangbei four-terminal VSC-HVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3638-3646.
- [31] 孙珂珂, 钟建英, 程铁汉, 等. 直流转换开关喷嘴的气流场仿真和试验研究[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 85-90.
SUN Keke, ZHONG Jianying, CHENG Tiehan, et al. Simulation and experimental study on the flow field of DC transfer switch nozzle[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 85-90.
- [32] 程铁汉, 黄瑜珑, 孙珂珂, 等. 高压直流转换开关和试验回路的研究[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 55-59.
CHENG Tiehan, HUANG Yulong, SUN Keke, et al. Investigation on current commutation capability of high voltage direct current commutation switch[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 55-59.
- [33] 吕玮, 王文杰, 方太勋, 等. 混合式高压直流断路器试验技术[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1685-1691.
LYU Wei, WANG Wenjie, FANG Taixun, et al. Test technology of hybrid HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1685-1691.
- [34] 裘鹏, 宣晓华, 陆翌, 等. 舟山柔直工程混合式直流断路器短路试验方案设计及现场实践[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1428-1435.
QIU Peng, XUAN Xiaohua, LU Yi, et al. Design and application of short circuit test scheme for hybrid DC circuit breakers in Zhoushan VSC - HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1428-1435.
- [35] 肖磊石, 盛超, 卢启付. 南方电网首台机械式高压直流断路器在柔性直流输电系统挂网短路试验及仿真[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2444-2450.
XIAO Leishi, SHENG Chao, LU Qifu. Short - circuit test and simulation of CSG first mechanical HVDC circuit breaker in VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2444-2450.

张长虹(1983—), 男, 教高, 研究方向为高压直流输电核心装备研发、高压开关设备智能化运维(通信作者)(E-mail: 183048839@qq.com)。