

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.12.033

柔直工程 500 kV 机械式直流断路器容量试验

刘平¹, 刘朴¹, 姚斯立¹, 傅明政², 邹晓明²

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077; 2. 上海思源高压开关有限公司, 上海 201108)

摘要: 机械式高压直流断路器是张北±500 kV 柔性直流输电工程的关键设备,其技术性能的可靠性是张北柔直示范工程系统安全稳定运行的可靠保障。由于高压直流断路器的运行工况复杂,仅依靠仿真和计算无法实现其性能的有效考核,因此容量试验是考核直流断路器的短时电流耐受能力、以及短路工况下的开断和关合能力,以及额定电流和小电流开合能力的唯一有效方法。文中介绍了张北柔直工程用 500 kV 高压直流断路器的容量试验技术、试验参数要求,以及试验回路的设计与实施。文中的内容了解、执行和研究高压直流断路器容量试验提供了参考与依据。

关键词: 机械式直流断路器; 主支路电流耐受试验; 转移支路电流耐受试验; 重合闸试验

Capacity Test of 500 kV Mechanical DC Circuit Breaker of Flexible DC Project

LIU Ping¹, LIU Pu¹, YAO Sili¹, FU Mingzheng², ZOU Xiaoming²

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. Shanghai Sieyuan High Voltage Switchgear Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: 500 kV HVDC Circuit-breakers is one of the key equipment of Zhangbei (±500 kV) Flexible DC Power Grid of Renewable Energy Demonstration Project. The reliability of its technical performance is the necessary guarantee for the safe and stable operation of Zhangbei Flexible DC Power System Demonstration Project. The operation condition of HVDC circuit breaker is complex, and its performance can not be effectively assessed only by simulation and calculation. Therefore, capacity test is the only effective method to evaluate the current withstand ability, short circuit breaking and making ability, rated current and small current switching ability of HVDC circuit breakers. This paper introduces the capacity test technology, test parameter requirements, and the design and implementation of test circuit of 500 kV high-voltage DC circuit breaker used in Zhangbei flexible DC project. At the same time, it also provides reference and basis for understanding, implementing and studying the capacity test of HVDC circuit breaker.

Key words: mechanical DC circuit breakers; main branch current withstand test; transfer branch current withstand test; reclosure test

0 引言

随着中国电力工业的快速发展,高压直流输电在技术和工程应用方面走在了世界的前列。目前,主要有基于线路换相的 LCC-HVDC 高压直流输电技术和基于器件换相的 VSC-HVDC 高压直流输电技术,前者主要用于点对点的两端直流输电系统,后者主要用于多端、网状的柔性直流输电系统^[1-5]。

张北±500 kV 可再生能源柔性直流电网示范工程主架构为四端柔性直流电网见图 1。包括丰

宁、康宝、张北和北京 4 个换流站,换流站采用 VSC-HVDC 技术,每个换流站出线均配备高压直流断路器。张北直流工程的 500 kV 高压直流断路器是该系统的关键部件之一,直流断路器是最为主要的保护设备,要求在几个毫秒内实现切除系统中发生的短路故障,可以快速、可靠地对系统中故障部分的隔离,以及快速、可靠地重合线路。直流断路器的目的是在于保障直流电网的安全稳定运行,提高直流电网可靠性。此外,直流断路器应具备带电投切能力,以实现换流站在直流

电网中灵活投退。

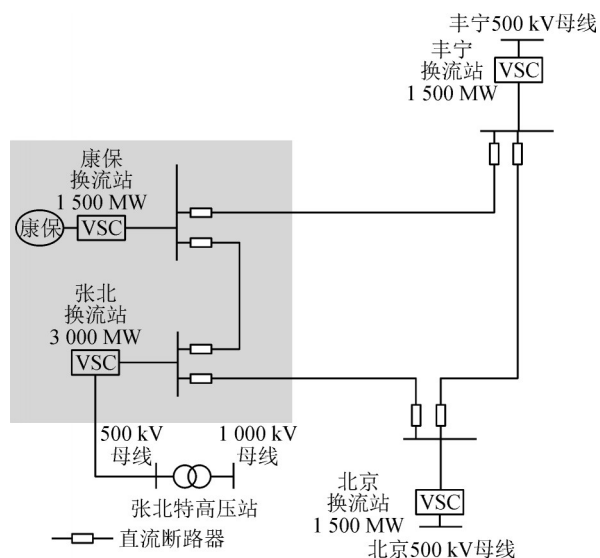


图1 张北工程直流断路器配置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DC circuit breaker configuration in Zhangbei project

多端、网状的柔性直流输电系统是将来电力发展和研究的热点,而高压直流断路器作为该系统的核心设备已成为最近几年国内外开关电器行业研究的重点。大容量开断与关合试验是考核高压直流断路器运行试验的重要手段,目前高压直流断路器的短路开断与关合试验技术和试验回路成为国内外大容量试验站的研究重点。文中概述性的介绍了张北柔直电网工程用500 kV高压直流断路器的容量试验技术、试验参数要求,以及试验回路的设计、实施^[6-15]。

1 500 kV机械式直流断路器系统组成及工作原理

1.1 系统组成

直流系统的电流为单极性、无过零点,直流断路器不能像交流断路器那样通过电流的自然过零点而熄弧开断,因此从技术上必须为直流断路器创造电流零点,实现直流电流的开断。500 kV机械式直流断路器主要由主支路、转移支路、耗能支路、缓冲支路、供能系统等五部分组成,通过一定的动作时间顺序,可以在直流断路器的几个部分间实现电流的转移和耗散,为直流断路器创造人工过零点,实现直流电流的开断,500 kV机械式直流断路器各部分的电气原理见图2。

主支路:由多断口快速断路器串联构成,用于导通与开断直流系统电流。主支路由多个快速断路器断口组成。

转移支路:由电抗器、预储能电容器和快速放电开关构成。

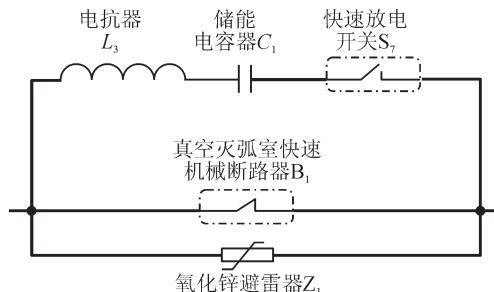


图2 500 kV机械式直流断路器电气原理

Fig. 2 Electrical principle of 500 kV mechanical DC circuit breaker

耗能支路:由多组避雷器通过串联的形式组成,每组避雷器根据需要由一定数量的避雷器并联组成,其用于抑制电流转移过程中的过电压和吸收线路及平抗器上储存的磁场能量。

供能系统:由UPS、500 kV主供能变、快速断路器供电隔离变组、转移支路供电隔离变组、升压变、PT供电隔离变组成。

1.2 工作原理

直流断路器一旦接到直流电网系统下发的分闸指令,首先,主支路断路器开始分闸,当其达到一定开距时,转移支路快速放电开关导通,投入反向电流,转移支路电容反向充电,高频电流与短路电流叠加流过主支路断路器,电流零点主支路断路器开断,电流转移至换流支路,主支路断路器断口电压快速上升,当电压超过MOV启动电压并使其导通,电流转移至耗能支路,转移支路快速放电开关关断。最终,MOV将线路电流限制到零,断路器断间建立稳态电压,完成一次分闸^[16-26]。

2 500 kV机械式直流断路器容量试验项目及参数要求

500 kV机械式直流断路器容量试验主要有,主支路、转移支路的短时电流耐受试验,额定短路故障电流、额定工作电流和小电流开断试验,以及关合额定短路故障电流试验、重合闸短路故障开断试验。

2.1 主支路短时电流耐受试验

主支路短时电流耐受试验主要是为了检验主支路快速机械开关短时耐受电流能力。短时电流耐受试验通过将试品接入电流源来考核。试验电流应分为两个阶段。第一阶段试验电流为4.5 kA过负荷电流且持续1 min,然后立即耐受的第二阶段试验电流波形见图3。

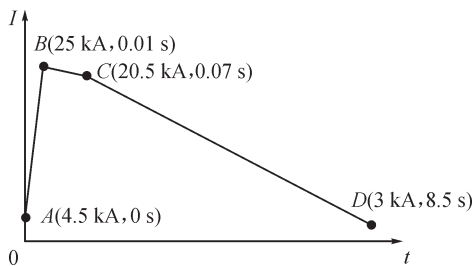


图3 主支路短时耐受电流第二阶段波形

Fig. 3 Second stage waveform of short-time withstand current of main branch

在第2阶段第3 ms快速机械开关开始快分,第11 ms快速机械开关开始合闸。原则是做到能量等效。主支路在导通短时电流后,不允许发生部件损坏或者失效。

2.2 转移支路短时电流耐受试验

转移支路短时电流耐受试验主要是为了检验转移支路部件的短时耐受电流能力。对转移支路单元模块考核,试验电流波形如下,原则是做到能量等效,在耐受电流过程中,在A点完成一次快速放电开关“关断—导通”,并在B点完成关断。转移支路不允许发生部件损坏或者失效。

试验过程中快速放电开关器件能量和电流峰值不低于下图4波形对应的能量和电流峰值,试验过程中进行两次关断。

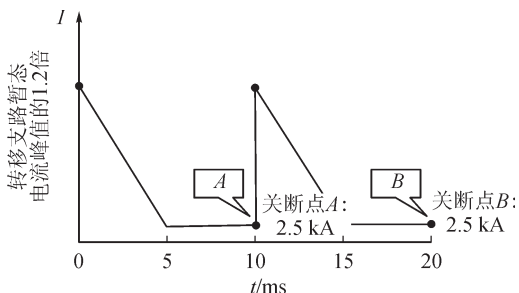


图4 转移支路短时耐受电流波形

Fig. 4 Short-time withstand current waveform of transfer branch

2.3 小电流开断试验

该试验方式是验证直流断路器开断直流系统中小电流的开断能力。试品为完整的直流断路器整机,包括控制保护设备以及隔离供能设备,确保所有设备的布置皆与运行时相同。

要求的开断电流为10、50、200、500、1 500 A。每档开断电流下正负方向各3次。

2.4 额定电流开断试验

该试验方式是验证直流断路器开断直流系统中正常工作电流的能力,以此来考核直流断路器的一次部分和二次部分的整体性能,是否满足对动作时序和开断时间等技术条件的设计要求。试品为

完整的直流断路器整机,控制保护设备以及隔离供能设备,确保所有设备的布置皆与运行时相同。

要求的开断电流为4.5 kA,每档开断电流正负方向各3次。

2.5 短路电流开断试验

该试验方式是验证直流断路器开断直流系统短路电流的能力及主支路换流能力。试验要求试品为完整的直流断路器整机,控制保护设备以及隔离供能设备,确保所有设备的布置皆与运行时相同。应针对以下3种开断电流值,并按照相应的次数要求,进行短路电流开断试验:

- 1)开断电流为7.5 kA,开断次数为正负方向各3次;
- 2)开断电流为15 kA,开断次数为正负方向各3次;
- 3)开断电流为25 kA,开断次数为能够开断25 kA电流(且满容量)的最大次数(正负方向各不小于15次),且不进行中间检修。

要求从试验波形上获取的试验电流开始上升至试验电流开始下降的时间间隔不大于6 ms。

2.6 短路电流关合试验

该试验方式是验证直流断路器关合短路故障电流的能力,以及在关合过程中直流断路器各部分的合闸时序配合是否正确。试品为完整的直流断路器整机,控制保护设备以及隔离供能设备,确保所有设备的布置皆与运行时相同。

要求的关合电流为4.5 kA,正负方向各3次。

2.7 重合闸短路开断试验

该试验方式是验证直流断路器按照直流系统要求的重合闸时序的短路开断能力。试品为完整的直流断路器整机,控制保护设备以及隔离供能设备,确保所有设备的布置皆与运行时相同。试验按照O— t_a —CO顺序分别动作,有两种不同的开断要求,具体如下:

1)试验1。要求试验电流为25 kA。第一次开断时,要求从试验波形上获取的试验电流开始上升至试验电流开始下降的时间间隔不大于6 ms。

间隔时间 t_a 等于300 ms。关合短路电流后,接到外部分闸指令开断。试验步骤为,直流断路器在关合后5 ms接到外部分闸指令并分断。直流断路器关合后的平均电流上升率为6.7 kA/ms,要求正负方向各3次(“O— t_a —CO”为1次)

2)试验2。第一次开断电流:25 kA。第一次开断时,要求从试验波形上获取的试验电流开始上升至试验电流开始下降的时间间隔不大于6 ms。间

隔时间 t_a 等于300 ms。关合短路电流后,因本体保护动作开断。试验步骤为,直流断路器在关合后因本体保护动作开断。直流断路器关合后的平均电流上升率为3.2 kA/ms,要求正负方向各3次(“O- t_a -CO”为1次)。

3 500 kV 机械式直流断路器容量试验回路及实施

3.1 主支路短时电流耐受试验

按照试验要求及参数,采用的试验回路见图5。通过能量等效的方法,将第1阶段4.5 kA/1 min的过负荷电流等效为25 kA/1.95 s的电流,将第2阶段电流等效为25 kA/2.26 s的电流。试验时通过能量等效原则,对直流断路器主支路在一次试验中完成25 kA/4.21 s的短时耐受电流,试验波形见图6。

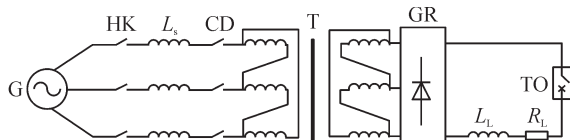


图5 主支路短时电流耐受试验回路
Fig. 5 Test circuit of main branch short-time withstand current

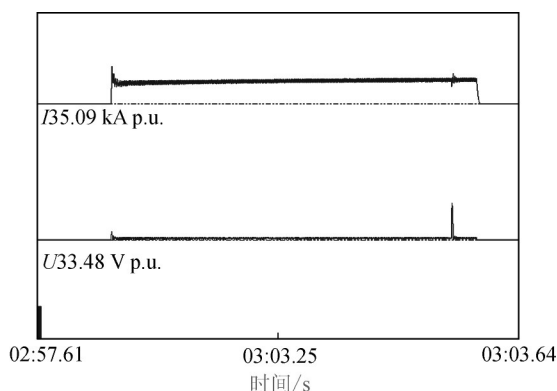


图6 主支路短时电流耐受试验波形

Fig. 6 Test wave form of main branch short-time withstand current

图5中:G为发电机;HK为合闸开关;CD为操作开关; L_s 为电抗器; R 为电阻;T为变压器;GR为整流装置; T_0 为试品。

图6中:第一栏为主支路耐受的电流波形,电流值为26.1 kA,通流时间为4.56 s,第二栏为主支路开关断口的电弧电压,测得电压值为46.2 V,燃弧时间为17.1 ms。

3.2 转移支路短时电流耐受试验

按照3.2节试验要求,采用单个组件进行试验,实验室采用两套振荡回路等效的试验方法进行,试验过程中需要保证快速放电开关器件能量和电流

峰值不低于下图4波形对应的能量和电流峰值,要求每次关断时刻的电流不小于2.5 kA,两次能量分别不小于 $2.85 \text{ kA}^2 \cdot \text{s}$ 和 $2.72 \text{ kA}^2 \cdot \text{s}$,试验波形见图7。

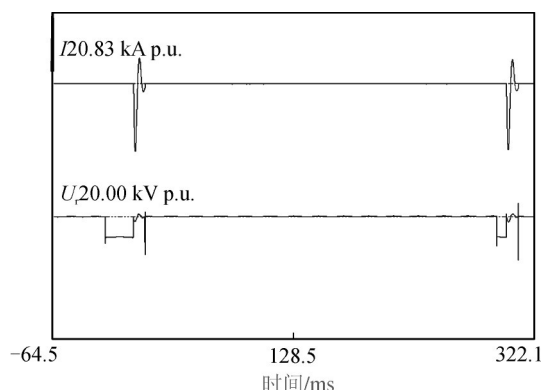


图7 转移支路短时电流耐受试验波形

Fig. 7 Test wave form of transfer branch short-time withstand current

3.3 小电流、额定电流、短路电流试验

按照2.3-2.5节试验要求,采用振荡回路为电源对直流断路器分别进行小电流、额定电流和短路电流开断试验,试验回路电气原理见图8。

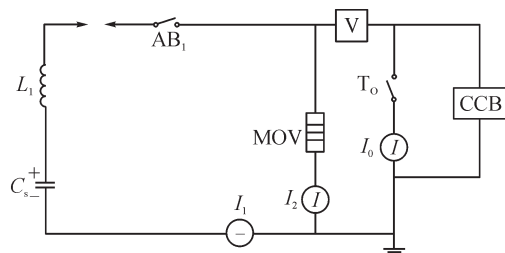


图8 直流断路器短路开断试验原理图

Fig. 8 Principle diagram of short-circuit interruption test for DC circuit-breakers

图8中: C_s 为电容; L_l 为电感;GP为间隙; AB_l 为辅助开关;MOV为避雷器; T_0 为主支路开关,CCB为转移支路;V为分压器; I_0 为主支路电流互感器; I_1 为系统电流互感器; I_2 为耗能支路电流互感器。

电源回路由电容器 C_s 、电抗 L_l 、间隙GP组成,为直流断路器提供电流以及直流断路器开断后的恢复电压。试验过程:开关 AB_l 、主开关 T_0 处于合闸位置,首先分别对电流回路电容器组 C_s 和转移支路的电容充电至计算值。充电完毕后,首先间隙GP在 T_1 时刻动作,短路电流流过主支路,主开关 T_0 在 T_2 时刻接到分闸命令开始分闸;转移支路快速放电开关在 T_3 时刻导通,反相电流回路贯通,高频电流流过主支路,主开关在电流零点开断。同时,主开关 T_0 断口两端恢复电压迅速升高,升到避雷器MOV的动作电压时,避雷器MOV动作,电流转移至避雷器支路,当通过直流断路器的电流降到要求值后,完成一次直流开断试验。

直流断路器进行 25 kA 短路电流的开断试验波形见图 9, 分断时间 2.3 ms, 恢复电压峰值为 780 kV。

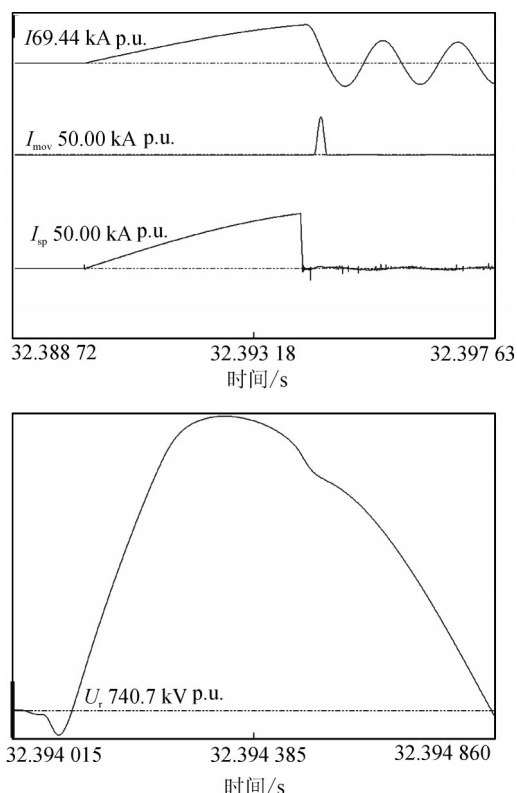


图 9 直流断路器开断 25 kA 短路电流试验波形图

Fig. 9 Test waveform of DC circuit-breakers interruption current in 25 kA

3.4 重合闸短路开断

按照 2.7 试验要求, 实验室采用了两套电源回路对直流断路器进行重合闸短路电流开断试验, 共进行了两种试验方式, 每种试验方式正负极性各 3 次, 一共进行了 12 次试验。

直流断路器进行 25 kA 短路电流重合闸开断试验波形见图 10, 一分开断电流为 25 kA, 分断时间 2.3 ms, 暂态恢复电压峰值为 780 kV; 二分开断电流为 13.4 kA, 分断时间 2.1 ms, 暂态恢复电压峰值为 380 kV。

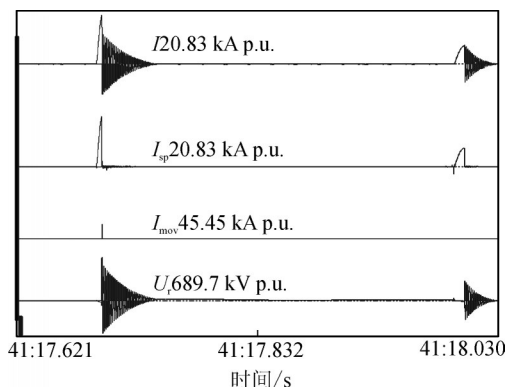


图 10 直流断路器开断 25 kA 短路电流试验波形图

Fig. 10 Test waveform of DC circuit-breakers interruption current in 25 kA

张北柔直示范工程 500 kV 直流断路器在西高院大容量检测室完成了小电流开断、额定电流开断、额定电流关合、短路电流开断、重合闸、主支路短时耐受电流和转移支路耐受电流等容量试验。直流断路器短路开断试验现场布置见图 11。

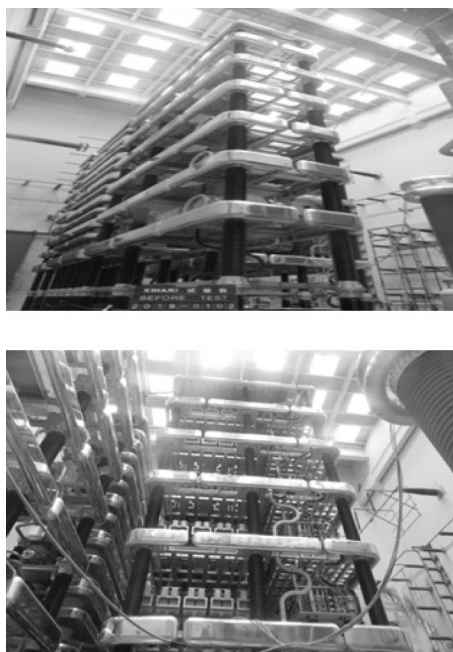


图 11 直流断路器短路开断试验现场布置图

Fig. 11 Field layout of DC circuit breaker short-circuit interruption test

4 结语

文中主要对张北柔直电网工程用 500 kV 直流断路器的容量开断试验进行了综述, 分别介绍了试验技术和试验方法, 主要就 500 kV 直流断路器的主支路耐受电流试验、转移支路耐受电流试验、小电流开断、额定电流开断、短路电流开断和重合闸开断等试验进行了介绍, 并给出了相关试验数据和典型试验波形图, 为高压直流断路器试验方法的研究和标准的制定提供了参考。

参考文献:

- [1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012:1-10.
XU Zheng. Flexible DC transmission system[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2012:1-10.
- [2] 何俊佳. 直流断路器发展综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2):9-14.
HE Junjia. Review of dc circuit breaker technology development[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2):9-14.
- [3] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10):8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-termi-

- nal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [4] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- ZHAO Wanjun. HVDC engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [5] 马为民, 吴方劼, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.
- MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [6] 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 Engineering, 2018, 54(7): 37-43.
- [7] 史宗谦, 贾申利. 高压直流断路器研究综述[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 1-9.
- SHI Zongqian, JIA Shenli. Research on high-voltage direct current circuit breaker: A review[J]. High Voltage Engineering, 2015, 51(11): 1-9.
- [8] 刘平. 高压直流断路器试验技术研究[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 73-78.
- LIU Ping. Investigation of high-voltage DC circuit breaker test technology[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 73-78.
- [9] 姚远. 高压直流断路器系统开断条件仿真研究[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 64-72.
- YAO Yuan. Simulation study on the breaking conditions of HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 64-72.
- [10] 郑占锋, 邹积岩, 董恩源, 等. 直流开断与直流断路器[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 445-449.
- ZHENG Zhanfeng, ZOU Jiyan, DONG Enyuan, et al. DC interruption and DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6): 445-449.
- [11] 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.
- [12] SHUKLA A, DEMETRIADES G D. A survey on hybrid circuit-breaker topologies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 627-641.
- [13] 丁骁, 汤广福, 韩民晓, 等. 基于LC电源的混合式高压直流断路器分断试验方法[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 2-9.
- DING Xiao, TANG Guangfu, HAN Minxiao, et al. Current-breaking test method based on LC source for hybrid HVDC circuit breaker[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 2-9.
- [14] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: A review identifying future research needs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [15] 孙广生, 王永荣, 冯荣琼, 等. 高压直流开断与自激振荡[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(s1): 96-99.
- SUN Guangsheng, WANG Yongrong, FENG Rongqiong, et al. Self-excited oscillation in HVDC interruption[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(S1): 96-99.
- [16] 姚广平, 王振刚, 董琦, 等. 一种高压直流断路器的电路构成及其试验方法[J]. 水电能源科学, 2011(7): 163-165.
- YAO Guangping, WANG Zhengang, DONG Qi, et al. The component of HVDC circuit breaker and its test method[J]. Water Resources and Power, 2011(7): 163-165.
- [17] JACOBSON B, KALSSON P, ASPLUND G, et al. VSC-HVDC transmission with cascaded two-level converters[C]// CIGRE Session. Paris, France: CIGRE, 2010: B4-B110.
- [18] BELDA N A. Testing of HVDC circuit breakers/NadewAdisuBelda; supervisors madeleine gibescu, renésmeets[J]. Digital Journalism, 2015, 2(2): 232-246.
- [19] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
- YUAN Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3.
- [20] BELDA N A, PLET C A, SMEETS R P P, et al. KEMA laboratories, DNV GL the netherlands[Z]. Holland: KEMA Laboratories, 2017.
- [21] AHMED N, HAIDER A, VAN HERTEM D, et al. Prospects and challenges of future HVDC super grids with modular multilevel converters[C]// Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011). Birmingham: IEEE, 2011: 1-10.
- [22] 马元社. 等高压直流断路器振荡回路特性[J]. 南方电网技术, 2011, 5(3): 10-13.
- MA Yuanshe. Characteristic of oscillation circuit in hvdc circuit breakers[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(3): 10-13.
- [23] 刘振亚. 特高压直流电气设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 148-152.
- LIU Zhenya. UHV DC Electrical equipment[M]. Beijing: China Electric Power Publishing Press, 2004: 148-152.
- [24] 李岩, 罗雨, 许树楷, 等. 柔性直流输电技术: 应用、进步与期望[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 7-13.
- LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC transmission Technology: Application, advancement and expectation[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 7-13.
- [25] THOMAS ERIKSSON. A low loss mechanical HVDC breaker for HVDC Grid applications[C]// CIGRE Session. Paris, France: CIGRE, 2014 B4-303: 1-8.
- [26] CWIKOWSKI O, CHANG B, BARNES M, et al. Fault current testing envelopes for VSC HVDC circuit breakers[C]// IET International Conference on AC and DC Power Transmission. [S.l.]: IET, 2015: 1393-1400.

刘平(1978—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为高压断路器大容量试验技术。