

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.11.018

机械式高压直流断路器开断性能试验研究

高俊珍¹, 淡淑恒¹, 顾 巍², 沈杰斌¹, 朱小贤¹

(1. 上海电力大学, 上海 200090; 2. 思源电气股份有限公司, 上海 201108)

摘要: 高压直流断路器是多端直流输电及高压直流系统联网的基础和安全保障,它不仅要能够开断短路电流而且要能够开断小负载电流,实现对高压直流系统的保护及控制功能。文中在振荡回路中对机械式高压直流断路器开断大电流及小电流的性能进行了测试。分别测试机械式高压直流断路器开断 17.5 kA 和开断 50 A 电流时的恢复电压值和恢复电压变化率。在试验中发现机械式高压直流断路器开断 17.5 kA 电流时可以在叠加高频振荡电流后的第 1 次过零点处开断,但是在开断 50 A 电流时需要在第 2 次电流过零点处才能开断。开断 50 A 电流时机械断路器上的恢复电压及恢复电压变化率均比开断 17.5 kA 电流时相应的值大。这一测试结果有助于全面了解高压直流断路器的性能。

关键词: 高压直流断路器; 人工过零; 直流开断; 电流转移

Experiment Research on Breaking Capability of Mechanical Type HVDC Circuit Breaker

GAO Junzhen¹, DAN Shuheng¹, GU Wei², SHEN Jiebin¹, ZHU Xiaoxian¹

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Sieyuan Electric Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: High voltage DC circuit breaker(HVDC)is the foundation and security guarantee of the interconnection of HVDC and HVDC systems. It can not only break short circuit current but also break small load current, so as to realize the protection and control of HVDC system. In this paper, the performance of mechanical high voltage direct current circuit breaker breaking large current and small current in oscillation circuit is tested. The recovery voltage and the recovery voltage change rate of the mechanical HVDC circuit breaker were respectively tested when the 17.5 kA and 50 A currents were cut off. In the experiment, it is found that the mechanical HVDC circuit breaker can break off at the first zero point when the high frequency oscillating current is superimposed when the 17.5 kA current is broken, but it needs to be broken at the second current zero point when the 50 A current is broken. When the 50 A current is switched off, the recovery voltage and the recovery voltage change rate of the mechanical circuit breaker are larger than the corresponding value when breaking the 17.5 kA current. The test results will help us to understand the performance of HVDC circuit breakers in a comprehensive way.

Key words: HVDC circuit breakers; artificial current zero; DC breaking; current transfer

0 引言

近年来机械式高压直流断路器作为多端直流输电技术及实现直流联网系统的重要设备之一而受到关注,国内外很多学者对它进行了深入的研究^[1-5],提出了各种各样的概念并设计了各种类型的样机^[4,6-7]。

试验是检验样机性能的最好也是唯一被认可的方法^[1,5,8-9]。目前常见的对机械式高压直流断路器的试验方法有:LC 振荡电流法,大容量试验法^[2-6,8-15]。大容量试验法成本很高,但是试验效果和现场完全等价。LC 振荡电流法尽管在等价性方面有欠缺但是简单、成本低,通过测试也能反映在同一试验条件

收稿日期:2020-04-06; 修回日期:2020-06-06

基金项目:国家自然科学基金项目(50577040);上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900)。

Project Supported by National Science Foundation of China(NFSC)(50577040), Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-Connected Technology(13DZ2251900).

下机械式高压直流断路器各部分的性能^[17,16-20]。对机械式高压直流断路器开断大电流的特性很多学者进行过测量,但是断路器不仅要开断大电流还需要开断小电流,而且断路器开断额定电流范围内的较小的电流的机会远比开断大的故障电流的机会多,系统发生短路的概率较低^[21]。在交流情况下断路器开断大电流和开断小电流的能力常常存在矛盾。因此文中采用LC振荡电流法着重通过试验测试机械式高压直流断路器开断大电流和开断小电流的性能是否相同,首先看能否开断,然后比较开断时的恢复电压及恢复电压变化率^[22-23]。

1 机械式高压直流断路器试品

试品所用的机械式高压直流断路器原理见图1。由于高压直流电流无电流自然过零点,因此机械式高压直流断路器一定要包含一个主动创造电流过零点的支路。图1中有两种方案,一种是图1(a)所示的LC高频振荡电流在起始时同方向叠加在机械断路器上,另一种是图1(b)所示的LC高频振荡电流在起始时反方向叠加在机械断路器上。在该次试验中试品上的电压极性和大小均不变,但是外电路的电流方向变了就等价于实现了同方向或者反方向的开断条件。图1中 $L=37.4\ \mu\text{H}$, $C=57\ \mu\text{F}$, 振荡频率 f 为3.5 kHz。机械断路器采用40.5 kV真空灭弧室带高速斥力机构。试品的振荡电路支路的电容每次做试验前都充好电,所有试验中电容充电电压不变,使得LC振荡电路向机械断路器提供的用以过零的电流不变。

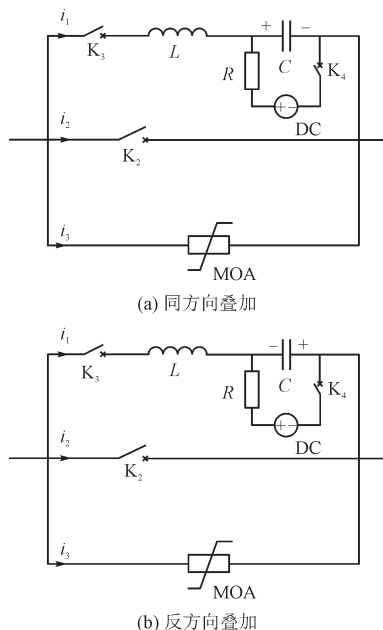


图1 机械式高压直流断路器的组成部分

Fig. 1 Components of a mechanical HVDC circuit breaker

2 试验回路及试验方法

试验回路见图2。采用 L_s 和 C_s 振荡产生50 Hz交流电流,当电流达到一定值时为图1所示的机械式断路器提供。在交流电流达到最大值时机械断路器打开,开始燃弧,在2 ms内高频振荡电流投入,为机械断路器提供电流过零点,此刻机械断路器 K_2 的高速斥力机构已经使断路器分闸达到最大开距。图2中各电路参数如下: $L_s=550\ \mu\text{H}$, $C_s=20\ \text{mF}$ 。改变 C_s 上的充电电压就可以改变主回路中的工频交流电流。在每次试验中高频振荡电流幅值均为32 kA,振荡频率均为3.5 kHz。

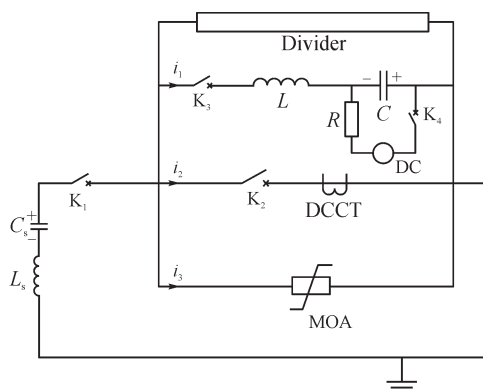


图2 机械式高压直流断路器的试验回路

Fig. 2 The test circuit of a mechanical high voltage DC circuit breaker

试验方法:试验开始时所有开关处于打开状态。先闭合机械断路器 K_2 ,然后闭合主开关 K_1 ,机械断路器中开始流过50 Hz交流电流。当 K_2 中的电流达到需要开断的交流电流值时打开 K_2 ,2 ms后闭合 K_3 ,从 K_2 中流过高频振荡电流,用罗格夫斯基线圈(图2中的DCCT)测量 K_2 回路的电流,用高压分压器(图2中的Divider)测量 K_2 两端的电压。将所有测量信号转化成光信号送入主控室的测量系统,通道3显示机械断路器中的电流信号,通道4显示机械断路器 K_2 两端的电压信号。

3 开断大电流的试验结果

在图2所示的电路中给 C_s 充电后关合回路,机械断路器 K_2 打开后高频电流冲入时刻工频瞬时电流为17.5 kA,用高频振荡电流为机械式断路器创造过零点。机械断路器开断的电流波形图和断口电压波形图见图3。图3中线1为机械断路器中电流波形,线2为断口上的电压波形。对机械断路器断口上电压波形的放大图见图4。从图3、4可见:机械

断路器在高频电流同方向冲入后第1个过零点处开断。加在 K_2 上的瞬态恢复电压(图4纵向光标线

所指)第1波幅值为10.2 kV, 恢复电压上升率为 $0.24 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 。

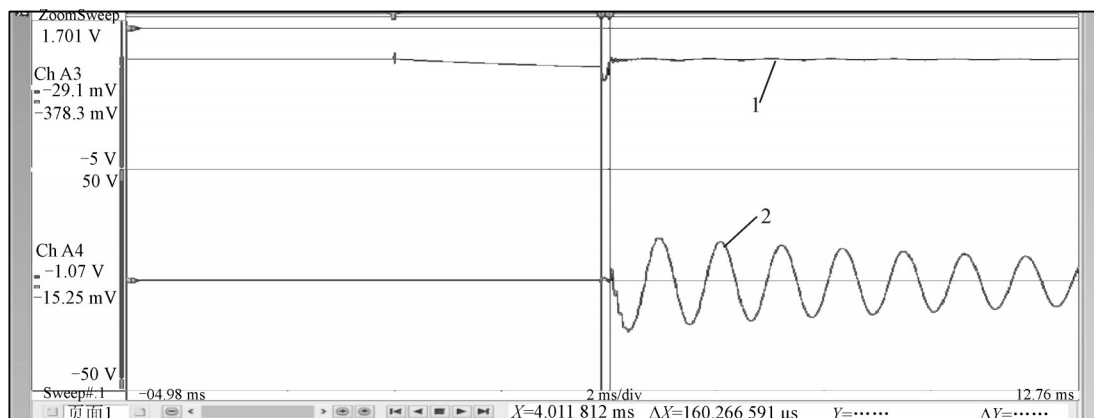


图3 开断17.5 kA电流时机械式高压直流断路器的开断波形图

Fig. 3 Breaking waveforms of mechanical HVDC circuit breakers when breaking 17.5 kA current

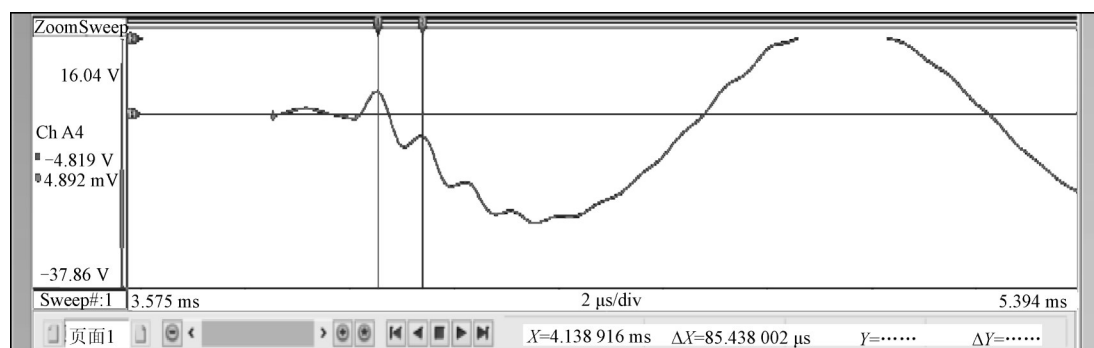


图4 开断17.5 kA电流时机械式高压直流断路器的恢复电压波形图

Fig. 4 Recovery voltage waveform of mechanical HVDC circuit breaker when breaking 17.5 kA current

4 开断小电流试验结果

改变图2中 C_s 上的充电电压,使得机械断路器在高频振荡电流叠加开始时回路瞬时电流为50 A,机械断路器 K_2 开断的波形图见图5。机械断路器的开断电流波形放大图见图6。对 K_2 断口上电压波形的放大图见图7。从图5-7可见: K_2 在高频电

流下燃弧两个半波后高频电流两次过零, K_2 在高频电弧电流第2次过零时熄弧、开断。机械断路器上的瞬态恢复电压在第1个局部峰值处为-34.7 kV。这是开断这台机械断路器开断17.5 kA电流后瞬态恢复电压的3.4倍。从图7可见开断50 A电流时的瞬态恢复电压变化率 R_m 为 $R_m = -34.7 \text{ kV} / 19.65 \mu\text{s} = -1.76 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 。

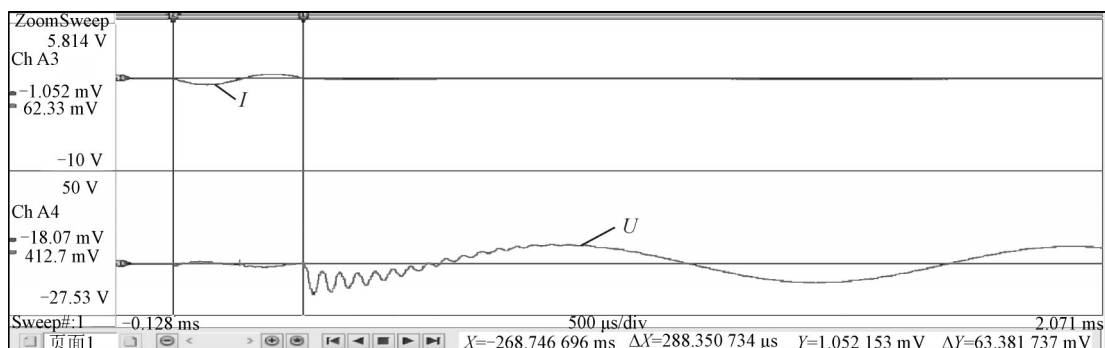


图5 开断50 A电流时机械式高压直流断路器的开断波形图

Fig. 5 Breaking wave diagram of mechanical HVDC circuit breaker when breaking 50 A current

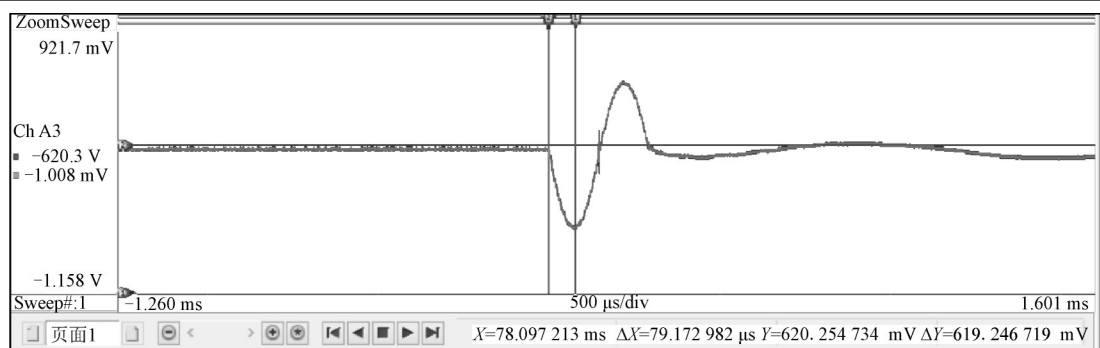


图6 开断50 A电流时机械式高压直流断路器的开断电流波形图放大图

Fig. 6 Enlarged diagram of breaking current waveform for mechanical HVDC circuit breaker when breaking 50 A current

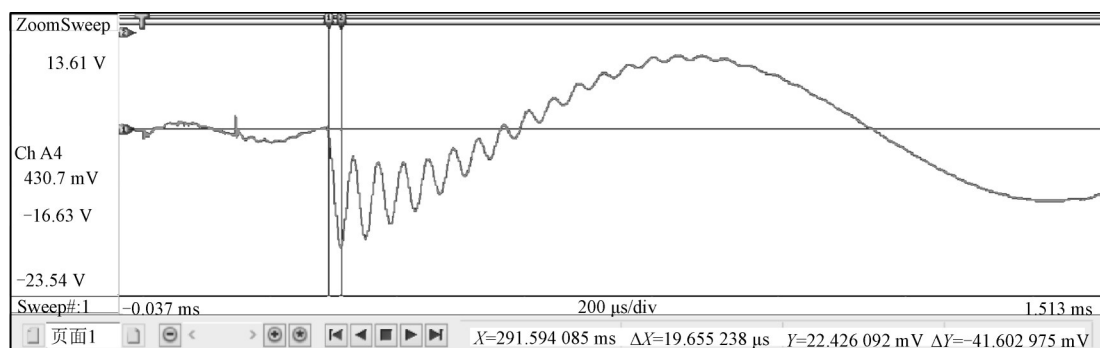


图7 开断50 A电流时机械式高压直流断路器的恢复电压波形图放大图

Fig. 7 The recovery voltage waveform diagram of mechanical HVDC circuit breaker when breaking 50 A current.

该值是开断17.5 kA时瞬态恢复电压变化率的7.3倍。比较机械断路器分别开断17.5 kA和开断50 A电流时恢复电压的波形放大图图4和图7可清楚看到：开断17.5 kA时稳态恢复电

压为17.8 kV，而开断50 A电流时稳态恢复电压却为22.4 kV，反而比开断大电流时的稳态恢复电压值高。将这些弧后的情况进行比较，见表1。

表1 开断17.5 kA及开断50 A电流时弧后情况的比较

Table 1 Comparison of arcing conditions after breaking 17.5 kA and breaking 50 A current

项目	瞬态恢复电压/kV	倍数	瞬态恢复电压变化率/(kV·μs ⁻¹)	倍数	稳态恢复电压/kV	倍数
开断17.5 kA	10.20	1.00	0.24	1.00	17.80	1.00
开断50 A	34.70	3.40	-1.76	7.30	22.40	1.26

5 结论

文中用LC振荡回路试验机械式高压直流断路器开断不同电流的开断性能主要试验在高频振荡电流下机械断路器能否顺利开断，这样才能将电流转移到高频振荡回路中。试验中用测试回路测试机械断路器中的电流及恢复电压，得出如下结论：

1)同一台机械式高压直流断路器开断17.5 kA电流可以在第1个高频电流过零时刻熄灭电弧，而开断50 A电流时却需要在第2个电流过零点处熄弧。机械式高压直流断路器开断小电流反而比开断大电流难。

2)同一台机械式高压直流断路器开断50 A电流

时的瞬态恢复电压是开断17.5 kA时瞬态恢复电压的3.4倍。同样的开距情况下开断小电流时熄灭电弧后电弧更加容易重燃。

3)同一台机械式高压直流断路器开断50 A电流时瞬态恢复电压变化率是它开断17.5 kA电流时的7.3倍，因此开断小电流后机械式高压直流断路器更加容易出现重燃。

4)开断50 A电流时被试的这台机械式高压直流断路器稳态恢复电压是它开断17.5 kA电流时的1.26倍。开断电流越小稳态恢复电压反而越高。

参考文献：

[1] 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 Apparatus, 2015, 51(11): 1-9.
- [2] BELDA N A, SMEETS R P P. Test circuits for HVDC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 285-293.
- [3] 姚 远, 刘 平, 刘 朴, 等. 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, LIU Ping, LIU Pu, et al. Simulation study on the breaking conditions of HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 64-72.
- [4] 孟永鹏, 贾申利, 荣命哲. 真空断路器机械特性的在线监测方法[J]. 高压电器, 2006, 42(1): 31-34.
- MENG Yongpeng, JIA Shenli, RONG Mingzhe. On-line monitoring method for mechanical characteristics of vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1): 31-34.
- [5] 贾申利, 史宗谦, 王立军. 真空断路器用于直流开断研究综述[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 12-16.
- JIA Shenli, SHI Zongqian, WANG Lijun. Review on the research of vacuum circuit breaker for DC breaking[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 12-16.
- [6] 张祖安, 黎小林, 陈 名, 等. 160 kV 超快速机械式高压直流断路器的研制[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 1-8.
- ZHANG Zu'an, LI Xiaolin, CHEN Ming, et al. Research and development of an ultra-fast 160 kV mechanical HVDC circuit breaker[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 1-8.
- [7] 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.
- [8] 何俊佳, 袁 召, 赵文婷, 等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 9-15.
- HE Junjia, YUAN Zhao, ZHAO Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 9-15.
- [9] 荣命哲, 杨 飞, 吴 翊, 等. 直流断路器电弧研究的新进展[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 1-9.
- RONG Mingzhe, YANG Fei, WU Yi, et al. New developments in switching arc research in DC circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 1-9.
- [10] 史宗谦, 贾申利, 朱天胜, 等. 真空直流断路器高速操动机构的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 18-22.
- SHI Zongqian, JIA Shenli, ZHU Tiansheng, et al. Investigations on high-speed actuator of vacuum DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 18-22.
- [11] 陈 名, 徐 惠, 张祖安, 等. 耦合型机械式高压直流断路器设计及仿真[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 1-8.
- CHEN Ming, XU Hui, ZHANG Zu'an, et al. Design and simulation of coupling mechanical high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 1-8.
- [12] 黄金强, 廖敏夫, 葛国伟, 等. 直流微网混合式直流断路器电流转移特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 119-125.
- HUANG Jinqiang, LIAO Minfu, GE Guowei, et al. Current transfer characteristics of the hybrid DC circuit breaker in DC micro-grid[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 119-125.
- [13] 徐 政, 肖晃庆, 徐雨哲. 直流断路器的基本原理和实现方法研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 1-11.
- XU Zheng, XIAO Huangqing, XU Yuzhe. Study on basic principle and its realization methods for DC circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 1-11.
- [14] SHIMADA R, TANI K, KISHIMOTO H, et al. Synthetic test methods of high-direct-current circuit-breaker[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1979, 126(10): 965-970.
- [15] SMEETS R P, KNOL P. High-power testing of 1 100/1 200 kV circuit breakers[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(6): 1-8.
- [16] 周 猛, 左文平, 林卫星, 等. 电容换流型直流断路器及其在直流电网的应用[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1045-1053.
- ZHOU Meng, ZUO Wenping, LIN Weixing, et al. Capacitor commutated DC circuit breaker and its application in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1045-1053.
- [17] ANDERSON J M, CARROLL J J. Applicability of a vacuum interrupter as the basic switch element in HVDC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 2007, PAS-97(5): 1893-1900.
- [18] 满家健, 孙 昊, 宁嘉琦, 等. 直流空气断路器小电流开断试验研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015(8): 8-11.
- MAN Jiajian, SUN Hao, NING Jiaqi, et al. Experimental research on small current breaking of DC air circuit breaker[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(8): 8-11.
- [19] CHILDS S E. A model for DC interruption in diffuse vacuum arcs[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1980, 8(4): 289-294.
- [20] PREMERLANI W J. Forced commutation performance of vacuum switches for HVDC breaker application[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1982, PAS-101(8): 2721-2727.
- [21] BENFATTO I, MASCHIO A, MANGANARO S. DC breaking tests up to 55 kA in a single vacuum interrupter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 3(4): 1732-1738.

- mechanism for 110 kV three -phase double -break vacuum circuit breaker[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996.
- [11] 闫静, 马志瀛, 金黎. 真空断路器弹簧操动机构中凸轮机构的优化设计[J]. 高压电器, 2004, 40(6): 420-423.
YAN Jing, MA Zhiying, JIN Li. Optimum design of the cam of spring operating mechanism in vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(6): 420-423.
- [12] 赵建明. 真空断路器凸轮操作机构的优化[J]. 船电技术, 2006, 26(5): 57-59.
ZHAO Jianming. Optimization of cam operating mechanism of the vacuum circuit breaker[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2006, 26(5): 57-59.
- [13] 赵玉芝, 张杰, 张鹏, 等. 真空断路器弹簧操动机构合闸凸轮优化设计[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 205-210.
ZHAO Yuzhi, ZHANG Jie, ZHANG Peng, et al. Optimum design of the spring actuator cam during closing operation in vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 205-210.
- [14] 杨志轶, 蒋舒. 大功率弹簧操动机构凸轮机构设计分析[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(3): 1-5.
YANG Zhiyi, JIANG Shu. Research on design method of cam mechanism of high power spring operating mechanism[J]. Machine Design & Research, 2017, 33(3): 1-5.
- [15] 吴伟光, 马履中. 真空断路器弹簧操动机构中凸轮机构的优化设计[J]. 江苏理工大学学报版, 2000, 21(4): 40.
WU Weiguang, MA Lvzhong. The optimum design for the cam device of the spring operating mechanism of the vacuum circuit breaker[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2000, 21(4): 40.
- [16] 李世芸, 王轩. 基于CAE技术的高压开关弹簧机构凸轮优化设计[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 20-23.
LI Shiyun, WANG Xuan. Cam optimization design of spring operating mechanism in high voltage switch based on CAE technology[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 20-23.
- [17] 杨秋玉, 彭彦卿, 庄志坚. 基于ADAMS的高压断路器弹簧机构动力学仿真与故障分析[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 67-73.
YANG Qiuyu, PENG Yanqing, ZHUANG Zhijian. Dynamic simulation and failure analysis of spring mechanism of high-voltage circuit breaker based on ADAMS[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 67-73.
- [18] 苏东海, 刘海. 新型大功率弹簧操动机构动力学仿真分析[J]. 制造业自动化, 2014, 36(8): 89-91.
SU Donghai, LIU Hai. Dynamics simulation and analysis of new high power spring operating mechanism[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(8): 89-91.
- [19] 苗红霞, 王宏华, 齐本胜. 高压断路器操动机构的动力学建模与仿真研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(17): 212-215.
MIAO Hongxia, WANG Honghua, QI Bensheng. Research on dynamic modeling and simulating of operating mechanism of high-voltage circuit breaker[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(17): 212-215.
- [20] 崔彦彬, 高志, 曹云鹏. 基于ADAMS的高压断路器操动机构动力学仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2006(4): 66-67.
CUI Yanbin, GAO Zhi, CAO Yunpeng. Dynamics simulation study on application ADAMS for the operating device for HV circuit[J]. Machinery Design & Manufacture, 2006(4): 66-67.

熊显智(1988—), 男, 工程师, 主要从事真空断路器及其弹簧操动机构的研究及设计(E-mail: 419133671@qq.com)。

(上接第 115 页)

- [22] SMEETS R P, LINDEN V D, WIM A. Verification of the short - circuit current making capability of high - voltage switching devices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 611-618.
- [23] SMEETS R P, LINDEN V D. Current-zero measurements of vacuum circuit breakers interrupting short - line faults[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(5): 852-858.
- 高俊珍(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事直流断路器设备研究(E-mail: 872910801@qq.com)。
- 淡淑恒(1969—), 女, 博士, 教授, 主要从事新型电气设备研制(通信作者)。