

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.02.015

直流盘形悬式绝缘子离子迁移测试系统的研制

骆晓龙¹, 张晋寅¹, 张源斌²

(1. 中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 针对高压直流盘形悬式瓷或玻璃绝缘子离子迁移问题,以直流绝缘子离子迁移试验标准为基础,对国内外直流绝缘子离子迁移的机理研究和开发的试验系统进行了分析和调研,设计了完整的直流绝缘子离子迁移试验系统和方案,并开发了一套基于 MSP430 单片机的直流绝缘子体电流采集处理系统,实现了 50 路体电流信号和 1 路电压信号的循环测量和数据采集,体电流测量结果自动量程转换。整套系统满足直流绝缘子离子迁移试验标准要求,具有一定的工程实用性。

关键词: 直流绝缘子; 离子迁移; 体积电流; 测量系统

Development of Measuring System of Ion Migration for DC Disc Suspension Insulators

LUO Xiaolong¹, ZHANG Jinyin¹, ZHANG Yuanbin²

(1. Maintenance & Test Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Focusing on ion migration of HVDC disc suspension porcelain or glass insulator, the ion migration test standards of DC insulator are considered, and the existing ion migration mechanism researches and test systems in the world are analyzed. Consequently, an ion migration test system of DC disc suspension insulator with test method is designed, and a set of current acquisition and processing system for DC insulator volume current measurement is developed based on MSP430 MCU. The acquisition and processing system can realize loop measurement and data acquisition of 50 channels of volume current signals and one channel of voltage signal, and can convert the range of measurement results automatically. The whole system meets the standards of the DC insulator ion migration test.

Key words: DC insulator; ion migration; volume current; measuring system

0 引言

随着直流输电电压等级的不断提高,直流盘形悬式绝缘子在长期运行下绝缘破坏日益严重。国内外一些专家对直流盘形悬式瓷和玻璃绝缘子(以下简称直流绝缘子)长期运行的劣化问题进行研究,提出了一些可能的老化机理,认为在直流电场下造成直流绝缘子老化击穿的主要原因可能是绝缘子材料中的离子迁移现象引起的^[1-10]。因此,对直流绝缘子进行离子迁移测量系统的研究,对提高直流绝缘子的抗老化性能,保证直流绝缘子安全稳定的运行具有重要意义。

离子迁移老化试验是确定直流绝缘子的长期老化性能的重要试验方法,是指在试验条件的电压和温

度下并耐受一定时间,模拟直流绝缘子在寿命内通过的电荷量,对于直流绝缘子的离子迁移试验,IEC 61325—1995 和 GB/T 19443—2004 都有相关规定,其关键技术就是大电阻小电流的测量。国内外现有的测量系统均存在一些问题,如自动化程度低,需手动切换测量通道和量程,微小电流测量装置价格昂贵,且测量装置与高压输出装置有电气连接,试验过程中若试品发生闪络,容易打坏仪表和终端^[11-27]。

为了克服上述试验装置的问题,笔者利用微电流测量技术和计算机无线通讯技术开发了一套全自动数字式无线离子迁移测量系统。

1 绝缘子离子迁移的原理

离子迁移现象会引起瓷或玻璃绝缘子头部体电

收稿日期:2014-09-13; 修回日期:2014-10-14

阻发生变化。体电流的变化是老化试验进行监测的一个重要项目,与绝缘子的寿命密切相关,体电流越小,离子迁移越少,老化性能就越好。也就是说,体电流可以作为判断绝缘子老化性能的重要依据。绝缘子是一种固体介质,其 $i-t$ 关系见图 1^[13]。

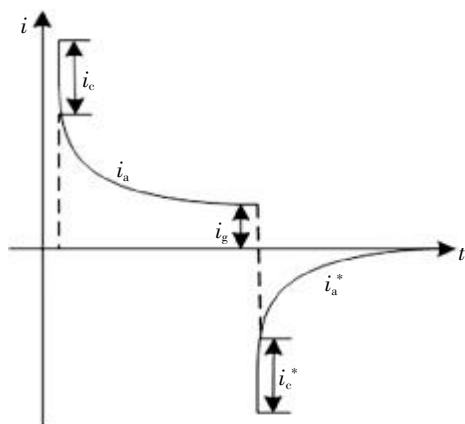


图 1 固体介质中的电流与时间的关系

Fig. 1 The relation between current and time of the solid medium

在直流电压作用下,电流与时间的关系见图 1 上部的曲线,曲线的下降部分为吸收电流 i_a ,是夹层界面极化、空间电荷极化等缓慢极化所造成。吸收电流的大小及其随时间的变化受到电极的构造、介质的种类以及温度、湿度的影响。吸收电流经过数分钟以上甚至几小时至几天的时间后,会完全衰减至一恒定电流值 i_g 。 i_g 称为泄漏电流,由介质的绝缘电阻所决定。离子迁移试验测量的主要对象就是绝缘子稳定后的体电流 i_g ^[13-14],所以测量系统的关键技术就是大电阻、小电流的测量。

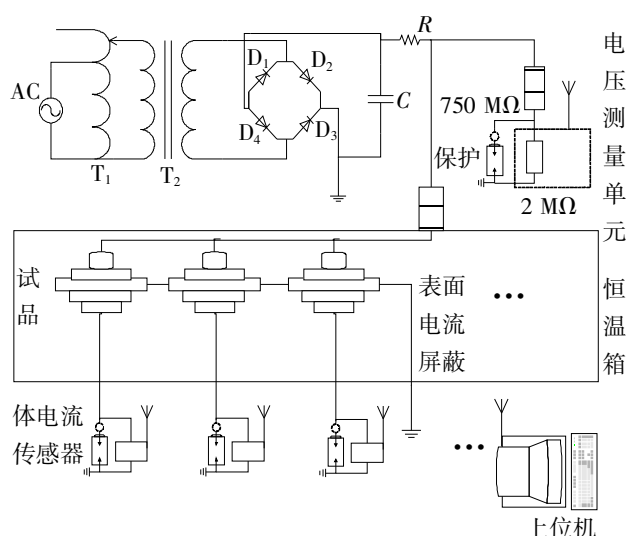
电场强度也是影响玻璃绝缘子材料电气性能的主要参数之一,场强越高,越不均匀,越容易引起玻璃绝缘子的绝缘的破坏。对于瓷或玻璃介质的绝缘子,在直流电场作用下,绝缘子头部靠近阳极的地方会形成 Na^+ 、 K^+ 耗尽层,厚度远远小于 1 mm,致使场强大部分降落在此耗尽层上;同时阳离子迁移会导致阴极附近电场增加,最大场强可达到平均场强的 1.5 倍^[1-3]。

2 试验系统的组成

文中所采用的离子迁移试验装置包括升温、升压和体电流测量系统。该装置能够对升温升压系统进行温度电压控制和保护,并通过离子迁移试验测量系统实现温度、电压和体积电流的测量。离子迁移试验回路见图 2。

3 升温、升压系统

要满足离子迁移试验期间对试品施加持续的直



AC—220 V 交流电源; T_1 —调压器; T_2 —变压器,变比为 1:100;
R—水电阻(10 kΩ); D_1 — D_4 —整流硅堆; C—滤波电容。

图 2 试验系统组成

Fig. 2 The test system

流电压和温度的多种负荷,对于试验电压和温度要连续可调,需要一套升温升压系统在高温条件下对直流玻璃绝缘子试品施加直流高压,以加速绝缘子试品的老化。系统主要包括了高压直流电源和可控恒温试验箱两个部分。

直流高压由 220 V 交流电压输入 0~400 V 调压器调压,再经过 200 V/20 kV 升压变压器升压,高压桥式整流硅堆整流,大电容稳压处理后得到。在试验控制台直接操作电源开断,调节调压器控制直流电压的升降。

可控恒温试验箱用来根据试验的要求调节温度,应能使所有试品均匀受热,温度波动尽量小。进入试验恒温箱的测量装置必须能耐受高温,信号应通过耐高温同轴电缆从烘箱的套管中引出。

4 数字式纳安级直流电流测量系统

以往测量系统采用成品微电流表,如果采用性能优良但昂贵的电流表,那么光是购买电流表的花费就十分巨大,而且电流表直接串联在回路中与上位机通过通信电缆通讯,一旦试品被高压击穿或发生沿面闪络,电流表很容易被打坏,并且有可能出现高压通过电缆打坏上位机的现象。该测量系统电流测量装置采用单片机控制,成本低,采样电阻并联过压保护元件,并且与上位机通过无线通讯,高压不会通过通讯导线对上位机造成危害。即使试验中试品闪络打坏测量模块,也可对测量模块进行快速更换。

测量系统能实现 51 路试验回路信号(50 路体电流测量信号,1 路直流高电压分压器信号)的全自动

测量,信号的采集、传输、显示、分析和处理也都由计算机自动完成,且全部实现数字化。

电流测量模块采用低功耗特性的德州仪器(Texas Instruments)的 MSP430 单片机^[11]。采用取样电阻法进行电流的测量,测量过程中,根据电流大小的不同选取不同的取样电阻来实现大范围内电流信号的测量,通过程控电子开关切换采样电阻,可实现量程的自动转换^[12]。电流测量模块结构见图 3。

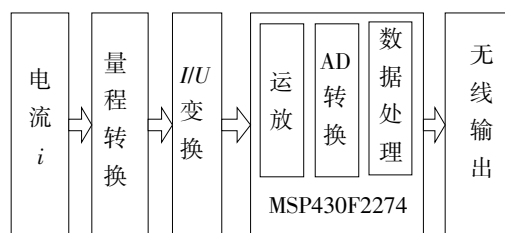


图 3 电流测量模块结构图

Fig. 3 Current measurement module structure diagram

为了实现量程自动转换,采样电阻应为一组电阻的并联组合,同时匹配 MAX7451 单刀单掷(SPST) 4 路程控电子开关,采用 5 个高精度(0.1%)、低温漂电阻作为各个量程的采样电阻,通过模拟电子开关进行不同量程之间的切换。各采样电阻的阻值由单片机的 AD 转换模块位数和输入阻抗确定^[14-15],其组合方式和各阻值对应量程见图 4。

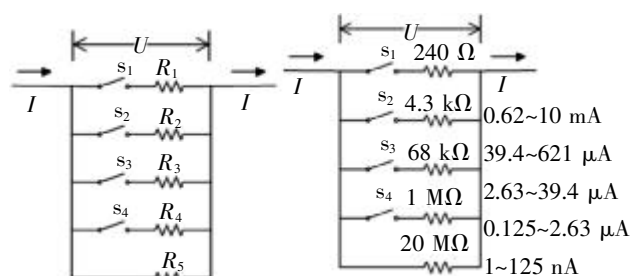


图 4 采样电阻的联结方式和各阻值对应量程

Fig. 4 Connection ways of sampling resistance and the resistance of the corresponding range

此种量程切换方可由单片机控制电子开关进行量程自动切换。从图 4 中可以看出, R_5 始终接入回路中,不会出现因电子开关的误操作而出现电流回路断路的情况。该系统的采样电阻还并联了吸收功率为 600 W、箝位电压 5 V 的双向瞬态电压抑制器,防止过电压损坏电子元件^[17]。

测量结果通过无线发送给上位机。无线模块的核心采用德州仪器(TI)2.4 GHz 无线芯片 CC2500^[16],可与 MSP430F2274 单片机进行控制字和数据通讯。

上位机界面采用 C++Builder 软件编写。包含设置窗口、体电流—时间趋势显示窗口、累计电荷量—时间趋势显示窗口、体电流实时波形显示窗口、温度

显示窗口和一系列控制按钮。测量系统的信号路数多达 51 路,测量前要发送测试命令;上位机发送命令时采用广播方式,传感器上传数据时采用点对点应答式通信方式避免了多路信号通讯冲突。51 路自动循环测量,电流探头分时发送数据,一次完整的测量可在 1 200 ms 内完成^[18]。

5 测量系统的校准和抗干扰措施

对测量模块进行标定,选用 Keithley 公司的 6485 型 5 位半数字式皮安表,具有的 10 fA 的分辨率与高灵敏度,测量范围为 20 pA~20 mA。将被校模块和标准数字式皮安表串联到直流小电流发生回路中,见图 5,比较两仪表读数。

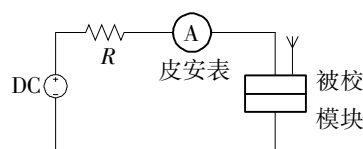


图 5 校准系统电路图

Fig. 5 Calibration system circuit diagram

在系统校准实验中发现工频交流电源对于测量系统会产生较大的干扰信号,直流信号产生装置所用到的直流稳压电源和校准所用的皮安电流表都使用外部 220 V 交流供电,串联入校准回路后会对测量结果产生很大的干扰,图 6 是测量模块上读取的微电流波形测量数据。

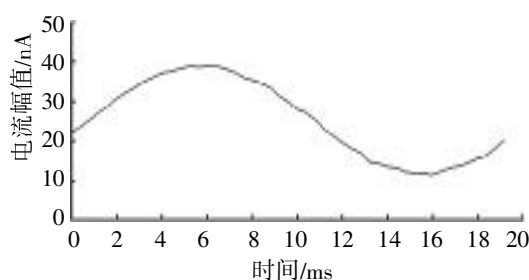


图 6 叠加工频干扰的直流微电流信号

Fig. 6 The tiny DC current signal with AC interference

为了防止升压系统对测量系统的干扰,测量系统采取了有效的屏蔽外部噪声的措施:试品电流信号传输导线采用耐高温同轴电缆屏蔽线,信号衰减减少,传输效率高,可直接从烘箱的低压套管中引出,50 路试品电流数据线绝缘包扎后,再用金属软管包裹来保护屏蔽。微电流测量模块采用金属外壳全屏蔽,试品电流信号通过单芯同轴电缆头引入测量模块,3.6 V 锂电池配电源稳压模块 NCP500V3.3 供电,电路利用 10 μ F 耦合电容并联稳压,以减小电源电压漂移对测量系统带来的干扰。屏蔽后得到的测量电流波形见图 7,可以看到大部分工频干扰

被屏蔽,只留下叠加了较小工频干扰的直流信号。

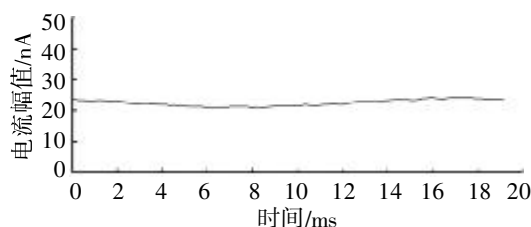
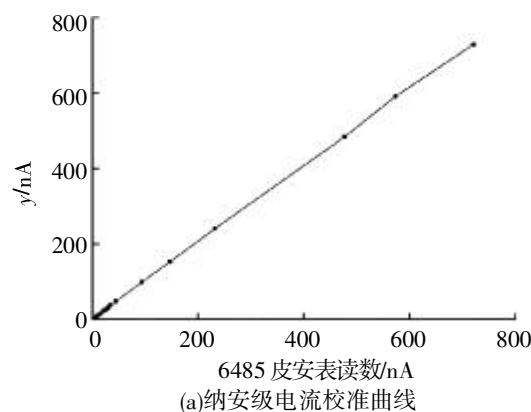


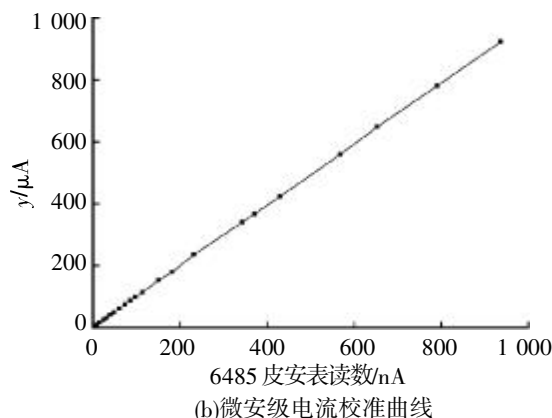
图 7 对外电路屏蔽后得到的测量电流波形

Fig. 7 Current signal after extern circuit shield

对电流测量探头校准数据进行整理,比较两表的读数,得到的电流测量探头的校准曲线见图 8,其中横坐标为 6485 皮安表读数,纵坐标 y 为测量系统读数。



(a)纳安级电流校准曲线



(b)微安级电流校准曲线

图 8 纳安级电流测量模块校准曲线

Fig. 8 nA current measurement calibration curve

由图 8 可知,测量模块与 6485 皮安表读数在 $(0\sim 1\ 000)\mu\text{A}$ 的测量范围内有很好的线性关系,测量模块在 nA 级电流测量时误差控制在 10%以内, μA 级电流测量时误差在 2%以内。

为验证离子迁移测量系统的精度满足试验要求,在烘箱升温过程 $(40\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C})$ 中分别用无线电流测量模块和 6485 型皮安表对直径为 72 mm,厚度为 7 mm 的钢化玻璃试品体电流进行监测(试品为三电极结构,可消除表面电流对体电流的影响),试品表面电流由屏蔽电极流入直流电源负极,不会影响测量结果,不同温度的体电流测量结果见图 9。

通过计算得到两种测量系统的误差在 $70\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$

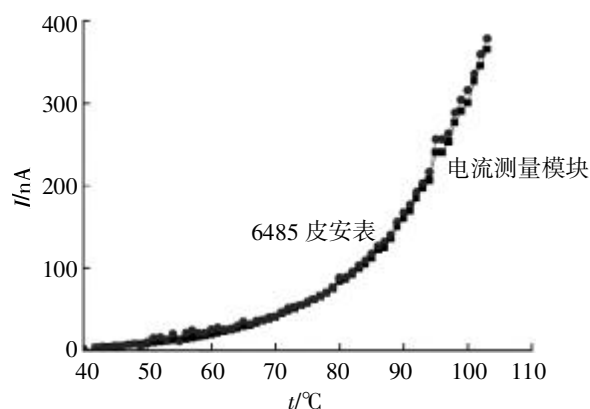


图 9 无线电流测量模块和 6485 型皮安表在 $40\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对试品体电流的测量结果比较

Fig. 9 Wireless current measurement module and a model 6485 picoammeter at $40\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ measurement experiment on current results

的范围内最大不超过 10%,在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下由于试品体电流小于 50 nA,屏蔽措施不足以达到测量微弱电流信号的水平,测量误差较大,达到 20%~40%。对于离子迁移试验,试验温度超过 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,且绝缘子试品的体电流在试验电压下在 100 nA 以上,满足试验规程对测量系统的要求。

6 结语

纳安级微电流的采集使用采样电阻法,应用基于 MSP430 单片机开发的直流绝缘子体电流采集处理系统,与上位机使用无线数据通讯,分散性小,控制可靠性高,测量误差小。实现了 50 路体电流信号和 1 路电压信号的循环测量和数据采集,可同时对 50 只直流绝缘子试品进行试验,体电流测量结果可在 mA~nA 级自动量程转换,通过校准使 nA 级电流测量误差控制在 10%以内, μA 级电流测量时误差控制在 2%以内,数字信号传输方式为无线,并带有过电流保护装置,满足直流绝缘子离子迁移试验标准,工程实用性较强。

参考文献:

- [1] 陈 豪. 500 kV 直流支柱式瓷绝缘子离子迁移的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2003.
CHEN Hao. Study on 500 kV DC post insulators ion migration[D]. Beijing: NCEPU, 2003.
- [2] 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. High voltage DC transmission technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [3] 陈 原, 关志成, 汤存燕. 合成绝缘子的离子迁移试验研究(I)[J]. 华北电力技术, 1998(2): 15-19.

- CHEN Yuan, GUAN Zhicheng, TANG Cunyan. Experimental study on ion migration of composite insulator(I)[J]. North China Electric Power, 1998(2):15-19.
- [4] 陈原, 关志成, 陆国庆. 合成绝缘子的离子迁移试验研究(II)[J]. 华北电力技术, 1998(4): 9-13.
- CHEN Yuan, GUAN Zhicheng, LU Guoqing. Experimental study on ion migration of composite insulator(I)[J]. North China Electric Power, 1998(4): 9-13.
- [5] 张虎. 玻璃绝缘子、合成绝缘子的运行性能比较[J]. 实用技术与管理, 2010(3): 41-42.
- ZHANG Hu. Comparative performance of glass insulator, composite insulator[J]. Practical Technology and Management, 2010(3): 41-42.
- [6] 汪晶毅. 复合绝缘子在特高压直流工程中应用探讨[J]. 电网与清洁能源, 2010(5):15-18.
- WANG Jingyi. Discussion on the application of composite insulators in UHV DC project[J]. Power Grid and Clean Energy, 2010(5): 15-18.
- [7] LI C R, QI B. Experimental study on the ion migration of rod samples for high voltage DC porcelain support insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(2): 347-351.
- [8] LI Xiaofeng, MACALPINE J M K, CHEN J. A novel insulator and its characteristics[J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2001, 17(2): 23-27.
- [9] 张晨, 佟继春, 宋正瀚. 应用大截面导线的特高压直流输电线路极间距优化研究[J]. 陕西电力, 2013, 41(6):26-30.
- ZHANG Chen, TONG Jichun, SONG Zhenghan. Study on polarity distance optimization of UHVDC transmission line with large cross-section wire[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(6):26-30.
- [10] 刘映龙, 李如锋, 马飞林, 等. 均压环对复合绝缘子电场分布的影响分析[J]. 陕西电力, 2013, 41(8):88-90.
- LIU Yinglong, LI Rufeng, MA Feilin, et al. Probe into effect of grading ring on electric field distribution of composite insulator[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(8):88-90.
- [11] 谢兴红, 林凡强, 吴雄英. MSP430 单片机基础与实践[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2008.
- XIE Xinghong, LIN Fanqiang, WU Xiongying. Foundation and practice of MSP430 single chip microcomputer[M]. Beijing: AAUP, 2008.
- [12] 于海洋, 袁瑞铭, 王长瑞. 微电流测量方法评述[J]. 华北电力技术, 2006(11): 51-54.
- YU Haiyang, YUAN Ruiming, WANG Changrui. Review of current measuring method[J]. North China Electric Power, 2006(11): 51-54.
- [13] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [14] 胡军柯. 电流测量电路的误差补偿和降噪技术的研究及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- HU Junke. Research and application on error compensation and noise reduction for current measuring circuit[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [15] 纪宗南. 集成 A/D 转换器应用技术和实用电路[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- Ji Zongnan. Integrated A/D converter application technology and practical circuit[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [16] 李文仲, 段朝玉. CC1110/CC2510 无线单片机和无线自组织网络入门与实践[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- LI Wenzhong, DUAN Zhaoyu. CC1110/CC2510 wireless microcontroller and wireless self introduction and practice of network organization[M]. Beijing: AAUP, 2008.
- [17] 张方, 苏秋萍. 可编程半导体抗浪涌保护器件[J]. 现代电子技术, 2005(9): 116-117.
- ZHANG Fang, SU Qiuping. Programmable semiconductor surge protection device[J]. Modern Electronic Technology, 2005(9): 116-117.
- [18] 肖建. C++Builder 6 编程基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- XIAO Jian. C++Builder 6 basic programming[M]. Beijing: Tsinghua University press, 2002.
- [19] 朱海涛. 高压直流悬式绝缘子离子迁移及测试系统的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- ZHU Haitao. Research on high voltage DC insulator ion migration and test system[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2006.
- [20] 关志成, 陈原, 梁曦东, 等. 关于开展超高压直流合成绝缘子研究的若干问题[J]. 高电压技术, 1998, 24(3): 62-68.
- GUAN Zhicheng, CHEN Yuan, LIANG Xidong, et al. Several problems of HVDC composite insulators[J]. High Voltage Technique, 1998, 24(3): 62-68.
- [21] 赵树平, 安腊梅. 超、特高压直流棒形支柱瓷绝缘子关键技术研究[J]. 电瓷避雷器, 2012(5):54-58.
- ZHAO Shuping, AN Lamei. Study on key technologies of EHV, UHV DC rod post porcelain insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(5):54-58.
- [22] 赵华忠, 袁超, 颜才升, 等. ± 800 kV 特高压直流耐张串复合绝缘子运行性能研究[J]. 电瓷避雷器, 2013(6):15-19.
- ZHAO Huazhong, YUAN Chao, YAN Caisheng, et al. Analysis of operating performance of composite insulators in 800 kV UHV DC tension strings[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(1): 15-19.
- [23] 徐击水, 张子蓬, 王淑青, 等. 基于 GNBR 算法的 BP 网络对绝缘子运行状态预测研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6):6-9.
- XU Jishui, ZHANG Zipeng, WANG Shuqing, et al. Research on the prediction for the operating state of insulators using BP network based on GNBR algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6):6-9.

(下转第 105 页)

- MA Zhenjun. Discussion on some issues about recovery protection firing for HVDC thyristor valve[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(4): 8-9.
- [10] 胡治龙, 许钊, 刘朴, 等. ± 1100 kV 特高压直流输电工程换流阀研发产品运行试验[J]. 高压电器, 2013, 49(4): 25-31.
- HU Zhilong, XU Fan, LIU Pu, et al. Operation test of thyristor valves designed for ± 1100 kV UHVDC power transmission [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4): 25-31.
- [11] 丁一工. UHVDC 换流阀及其晶闸管元件试验程序的优化[J]. 电力建设, 2008, 29(2): 1-5.
- DING Yigong. Optimization of UHVDC conversion valve and thyristor test procedures [J]. Electric Power Construction, 2008, 29(2): 1-5.
- [12] 罗玉金. 高压直流输电系统换流阀保护技术分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(10): 146-149.
- LUO Yujin. Analysis of converter valve protection in HVDC projects[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(10): 146-149.
- [13] 周会高, 许钊, 贾一凡, 等. 特高压直流输电换流阀运行试验的预期参数[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 74-80.
- ZHOU Huigao, XU Fan, JIA Yifan, et al. Prospective testing parameters for operational test of thyristor valves for ultra high voltage direct current [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 74-80.
- [14] 陆建挺, 杨涛, 申萌, 等. HVDC 晶闸管换流阀非周期触发试验中恢复期保护的探讨[J]. 高压电器, 2011, 47(11): 102-105.
- LU Jianting, YANG Tao, SHEN Meng, et al. Discussion on recovery protection for HVDC thyristor valve in the non-periodic firing tests [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11): 102-105.
- [15] 姚为正, 张 建, 常忠廷, 等. 基于 5 英寸晶闸管的 ± 800 kV 特高压直流输电换流阀组件的研制[J]. 电力设备, 2007, 8(3): 12-14.
- YAO Weizheng, ZHANG Jian, CHANG Zhongting, et al. Development of thyristor valve module based on 5-inch thyristor for ± 800 kV UHVDC transmission[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(3): 12-14. [12]
- [16] 梁旭明, 张 平, 常 勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
- LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [17] 解 婷, 汤广福, 郑健超, 等. 高压直流晶闸管阀故障电流下反向电压特性的分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 140-146.
- XIE Ting, SHANG Guangfu, ZHENG Jianchao, et al. Analysis on reverse voltage characteristics of HVDC thyristor valves in the fault state [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 140-146.
- [18] 罗 湘, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 电压源换流器高压直流输电换流阀的试验方法[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 25-29.
- LUO Xiang, SHANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Test methods of converter valves in VSC-HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 25-29.

江 戈(1972—), 女, 工程师, 从事超、特高压直流输电换流阀及新型大功率电力电子方面的研究试验管理工作。

岳 珂(1989—), 女, 博士研究生, 研究方向为直流输电技术以及换流阀试验技术等。

李少斌(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流换流阀及其试验技术。

(编辑 袁 妮)

(上接第 98 页)

- [24] 闫士涛, 何 宇, 石岩龙. 750 kV 直线塔整串绝缘子带电更换方法[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 30-34.
- YAN Shitao, HE Yu, SHI Yanlong. Live replacement methods of the whole-bunch insulators on the 750 kV suspension tower[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(2): 30-34.
- [25] 郭文勇, 独亚军, 魏存娣, 等. 数学形态学在绝缘子泄漏电流在线监测中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(11): 20-24.
- GUO Wenyong, DU Yajun, WEI Cundi, et al. Application of mathematical morphology in on-line leakage current monitoring of insulators[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(11): 20-24.
- [26] IEC 61325—1995 Insulator for overhead lines with a national voltage above 1 000 V—ceramic or glass insulator units for DC system—definitions, test methods and acceptance criteria[S]. 1995.
- [27] 中国电器工业协会. GB/T 19443—2004 标称电压高于 1 000 V 的架空线路用绝缘子—直流系统用瓷或玻璃绝缘子元件—定义、试验和接收准则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- China Electrical Equipment Industrial Association. GB/T 19443—2004 Insulator for overhead lines with a national voltage above 1 000 V—ceramic or glass insulator units for DC system—definitions, test methods and acceptance criteria[S]. Beijing: China Standard Press, 2004.
- 骆晓龙(1978—), 男, 硕士, 工程师, 从事高压试验技术、海底电缆技术的研究。
- 张晋寅(1986—), 男, 硕士, 从事高压试验技术研究。
- 张源斌(1948—), 男, 研究员, 从事高电压测控技术、光 CT、光 PT 方向的研究。

(编辑 袁 妮)