

基于VBE配合的晶闸管阀功能测试系统的研制及实现

杨帆¹, 余振球², 张翔¹, 刘磊¹, 郑力¹, 周晨¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102; 2. 国家电网有限公司直流技术中心, 北京 100052)

摘要: 晶闸管阀广泛应用于常规直流输电、SVC、直流融冰等工程中,其性能的好坏是工程正常运行的关键。晶闸管阀安装完成后、系统调试前,以及更换晶闸管级元部件后,必须进行功能试验,对晶闸管级在各种工况下的电压、电流及回报光信号进行采集检测,判断各项功能和性能是否正常。在以往工程现场进行测试时,为实现晶闸管级的触发,需将已经插好的正常运行触发/回报光纤拔掉,换上和测试仪相连的测试光纤,测试完成后再插回原来的光纤,反复的插拔操作可能造成光路耦合度的改变和光纤及光器件的污染和损伤,且重新插入后无法确定其功能是否正常,影响设备可靠性。因此有必要设计研制一种用于工程现场的晶闸管阀功能测试系统,在不移动任何工程光纤的前提下,对晶闸管级的阻抗、触发、保护、耐压等进行全面测试,确保在投入运行前排除故障。文中基于测试仪及VBE的功能和时序配合,将测试仪、晶闸管阀、VBE组成一整套功能测试系统,该测试系统测试时仅需将测试仪的电气连接线连接到晶闸管级两端,便可实现对电气量和光信号的全面检测,简单高效可靠。

关键词: 晶闸管阀; 功能测试; VBE; 功能时序配合

Development and Realization of Thyristor Valve Function Test System Based on Coordination with VBE

YANG Fan¹, SHE Zhengqiu², ZHANG Xiang¹, LIU Lei¹, ZHENG Li¹, ZHOU Chen¹

(1. Nanjing Nari-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. STATE GRID Corporation of China, Beijing 100052, China)

Abstract: Thyristor valve is widely used in LCC-HVDC, SVC, DC-based deicing etc. The performance of Thyristor valve is significant to the normal operation of the project. Between installation and commissioning, or after the replacement of thyristor-level components, functional test must be carried out on the thyristor levels to check its voltage, current and optical signal under a variety of operation conditions, and to judge whether all functions and performance are normal. During site test the normal operation fiber connected between TCU and VBE must be changed to test fiber which is connected between TCU and tester in order to trigger thyristor. When finished, optical fiber must be changed back. Repeated plug-pull may cause contamination and damage to optical fiber and other optical devices, and it can't be determined whether the function is normal after reinsertion, finally decrease system reliability. Therefore, it is necessary to design a thyristor valve functional test system for the site test. All tests of thyristor level, including impedance, firing, protection, withstand voltage strength and other items, can be carried out without moving any connected fibers. Based on coordination of the function and timing sequence between the tester and VBE, the tester, thyristor valve and VBE are combined to form a functional test system. During test, there is only electrical connection between the thyristor level and the tester. A whole testing of electrical signals and optical signals can be achieved efficiently and reliably.

Key words: thyristor valve; functional test; VBE; coordination of function and timing sequence

收稿日期:2020-02-24; 修回日期:2020-04-25

基金项目:国网电科院项目资助(JS1900543)。

Project Supported by Foundation item: Funded by project item of NARI(JS1900543).

0 引言

晶闸管阀广泛应用于直流输电、SVC、直流融冰等场合,在其中起到关键的换流变流作用,是最核心的一次设备之一^[1-2]。晶闸管阀在正式投运前、年检时以及更换元部件后都需要进行功能试验^[3],对晶闸管级在各种工况下的阻抗、触发、保护、耐压等功能和性能进行全面测试。

在原有测试系统中,测试仪需要接收TCU(thyristor control unit 晶闸管控制单元)的IP(indicate pulse 回报脉冲)信号进行检测,并输出FP(firing pulse 触发脉冲)使晶闸管导通,为此需要将TCU上原有连接到VBE(valve base electronics 阀控单元)的运行光纤拔除,插上和测试仪连接的测试光纤,测试完成后再换回原有和VBE之间的运行光纤。在拔插后,光纤头断面和光器件之间的相对位置发生移动,导致光路耦合度被改变至未知状态,且拔插操作可能使运行光纤及光器件受到污染和损伤。

文中研制了一种基于VBE测试时序配合的晶闸管阀功能测试系统,在工程运行光纤完成敷设和插入后,通过测试仪和VBE之间的时序配合,利用电气量实现检测光信号的目的。实际测试时,仅需将测试仪的电气输出线连接到晶闸管级两端,便可完成所有测试项目,同时还能检验VBE到TCU之间的光触发回报系统^[4],整个测试系统功能齐全且简单高效。

1 晶闸管级原理及测试项目介绍

以直流工程为例,单晶闸管级电气原理见图1。

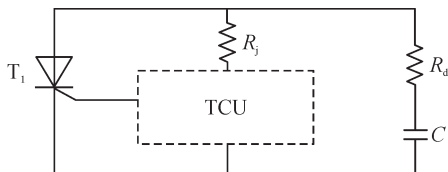


图1 晶闸管级电气原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single thyristor level

图1中各元部件见表1。

表1 晶闸管级元器件

Table 1 Main components of single thyristor level

序号	元器件
T_1	晶闸管
R_j	静态均压电阻
R_d	阻尼电阻
C	阻尼电容
TCU	晶闸管控制单元

晶闸管是最核心的器件,可由TCU向其门

级注入触发信号后导通。静态均压电阻用于直流电压下各晶闸管级之间的均压。阻尼电阻和阻尼电容的主要功能是抑制在晶闸管关断过程中由于电流突变在回路电感上产生的反向电压过冲。

在正常工况下,TCU每个工频周期取能后向VBE发送一个回报信号IP,并接收VBE下发的FP后触发晶闸管导通。除正常触发功能外,TCU还具有正向过电压保护和反向恢复期保护功能^[5],在晶闸管处于断态或反向恢复期内,TCU检测到晶闸管级两端电压超过对应保护定值时将产生保护触发脉冲,强制触发晶闸管导通,使其免受过电压损坏。其中,在发生正向过电压保护时,TCU会回报一个保护性触发IP,为避免VBE将其和电流断续时取能补发的IP相混淆,保护性触发IP采用脉宽范围为 t_2 的宽脉冲IP₂,区别于正常IP脉宽范围为 t_1 的窄脉冲IP₁,防止信号误报。

晶闸管级功能测试是基于上述各元器件的功能和特性所设计^[6-7],结合实际需求和相关标准,见表2^[8]。

表2 晶闸管级功能测试内容

Table 2 Test items of thyristor level

名称	功能
阻抗测试	验证晶闸管级在不同频率下的阻抗特性
低压触发测试	验证TCU的正常取能及触发功能
电流断续测试	验证TCU在电流断续时的快速取能及触发功能
反向恢复期保护测试	验证TCU在反向恢复时间窗口内的保护功能
反向恢复期结束耐受测试	验证晶闸管级在反向恢复时间窗口外的正向耐压性能
正向过电压保护测试	验证TCU的正向过电压保护及保护性触发IP回报功能
反向耐压测试	验证晶闸管级的反向耐压性能

2 测试系统框架及功能设计

现场设备在正常运行时的连接示意图2。单个TCU通过两根工程运行光纤和VBE连接,用于传递IP和FP信号。

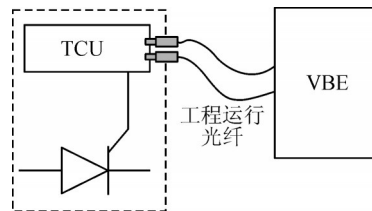


图2 正常运行连接状态示意图

Fig. 2 Connection of normal operation

原测试系统的连接示意图3(a)。测试时需要将TCU和VBE的工程运行光纤拔除后插入测试光纤,测试结束返回图2所示正常运行连接状态后无法验证光路及光纤是否完好^[9]。

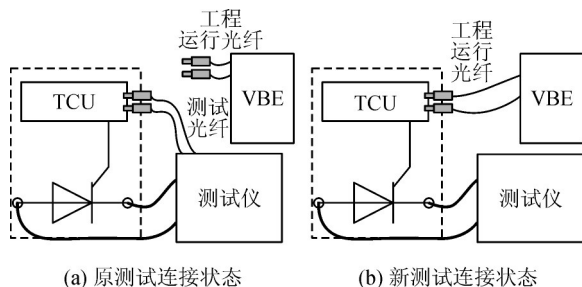


图3 测试连接状态对比示意图

Fig. 3 Comparison of different connection

图3(b)相比于原测试系统中需要拔插工程运行光纤的方式,新测试系统保持工程运行光纤不动,将VBE加入测试系统^[10],测试仪只需连接电缆到晶闸管级两端。新测试系统的功能架构见图4。

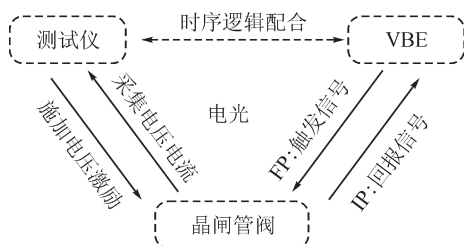


图4 测试系统功能框架图

Fig. 4 Function frame of test system

由图4可知,测试仪和VBE分别和晶闸管阀进行电气量及光信号的交互,测试仪和VBE之间按照事先规定好的时序及逻辑进行配合。具体实现方式为:进入每个测试项目后测试仪施加规定时序的电压波形到晶闸管级两端,VBE在接收到TCU发送的IP后按规定逻辑发送FP触发晶闸管导通,测试仪采集整个试验过程中晶闸管级的电压电流进行判断,得出试验结果。

可以看到,新测试系统不但无需拔插工程运行光纤,而且测试过程中还可以起到对其光路进行测试的作用。

3 测试项目详细设计

3.1 阻抗测试

晶闸管级在断态时的阻抗特性表现为含电阻和电容的复阻抗。测试仪向晶闸管级施加直流电压及不同频率的交流电压,通过电压和电流计算各种频率下的复阻抗,判断晶闸管及各阻容元件的状态是否正常。

3.2 低压触发测试

T₁:测试仪在晶闸管级两端施加工频电压;

T₂:VBE在连续收到规定个数 N 的IP₁后向TCU发送一个FP使晶闸管在该周期导通;

T₃:测试仪继续施加若干个周期工频电压后结束试验。

测试仪通过检测FP发送后的电压电流的幅值,判断TCU回报及触发功能是否正常。测试波形见图5。

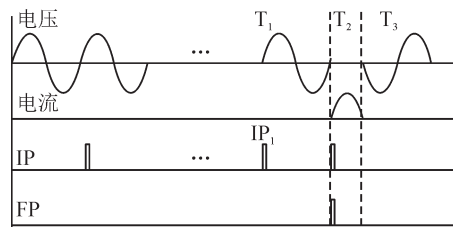


图5 低压触发波形图

Fig. 5 Waveform of low-voltage firing test

3.3 电流断续测试

T₁:同上;

T₂:VBE在连续收到 N 个IP₁后向TCU发送1个FP使晶闸管在该周期导通,导通一定时间后测试仪断开回路使晶闸管电流截断,在等待大于晶闸管反向关断时间后,测试仪合上回路使晶闸管级重新承受正压并迅速取能回报IP,VBE收到该IP信号后再次发送FP使晶闸管导通;

T₃:同上。

测试仪根据电流导通次数判断晶闸管级电流断续功能正常。波形见图6。

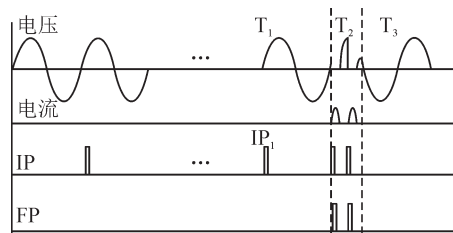


图6 电流断续波形图

Fig. 6 Waveform of intermittent current test

3.4 反向恢复期保护测试

T₁:同上;

T₂:VBE在连续收到 N 个IP₁后向TCU发送1个FP使晶闸管在该周期导通,随后在电流过零的一定时间窗口内,测试仪施加高于反向恢复期保护定值的冲击电压,TCU触发晶闸管导通;

T₃:同上。

测试仪根据保护时的电压电流幅值判断TCU的反向恢复期保护功能是否正常。波形见图7。

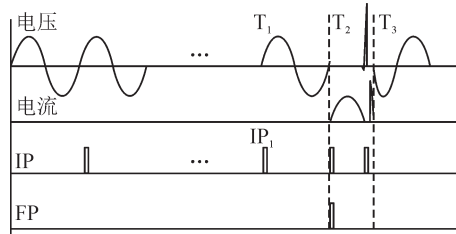


图7 反向恢复期保护波形图

Fig. 7 Waveform of reverse recovery protection

3.5 反向恢复期结束耐受测试

T₁:同上;

T₂: VBE在连续收到 N 个 IP_1 后向TCU发送1个FP使晶闸管在该周期导通,随后在电流过零后的一定时间窗口外,测试仪施加高于反向恢复期保护定值但低于正向过电压保护定值的冲击电压,TCU不触发晶闸管导通;

T₃:同上。

测试仪根据电压电流幅值判断TCU在反向恢复期保护窗口时间外是否可靠不保护。波形见图8。

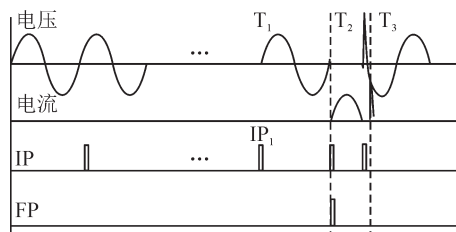


图8 反向恢复期结束耐受波形图

Fig. 8 Waveform of impulse test after reverse recovery stage

3.6 正向过电压保护测试

本项试验较为特殊,晶闸管级发生正向过电压保护时,TCU向VBE发送1个 IP_2 ,区别于正常取能回报的 IP_1 ,在试验中除检测晶闸管级是否正确发生正向过电压保护以外,还需要对 IP_2 的宽度进行检测。具体试验过程如下。

T₁:同上;

T₂: VBE连续收到 N 个 IP_1 后向TCU发送1个FP使晶闸管在该周期导通,在该阶段测试仪通过检测导通时的电压电流幅值判断TCU和光回路是否正常;

T₃:测试仪继续施加1个周期工频电压;

T₄:测试仪施加1个超过TCU正向过电压保护定值的冲击电压至晶闸管级两端,TCU发出保护性触发脉冲使晶闸管导通,并且向VBE发送1个 IP_2 ,在该阶段测试仪通过检测保护性触发时的电压电流幅值判断晶闸管级的正向过电压保护功能是否正常;

T₅:同T₁;

T₆: VBE连续收到 N 个 IP_1 后,根据T₄阶段是否收到来自TCU的 IP_2 决定在本阶段是否发送FP触发脉冲,若T₄阶段收到则本阶段发送FP,反之则不发送,在该阶段测试仪通过是否检测到晶闸管级导通判断TCU在T₄阶段是否正确发送 IP_2 。

整项试验的波形见图9。

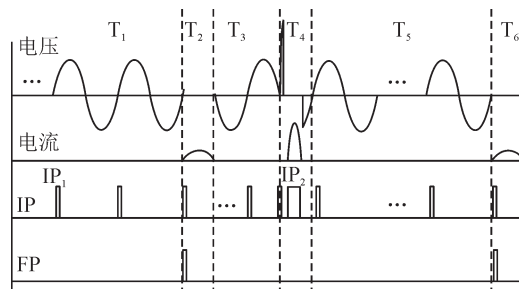


图9 正向过电压保护测试波形图

Fig. 9 Waveform of protection test of forward overvoltage

3.7 反向耐压测试

测试仪在晶闸管级两端施加略低于 U_{RRM} (晶闸管反向重复峰值电压)的反向冲击电压^[11],根据电压电流幅值判断反向耐压性能是否正常。波形见图10。

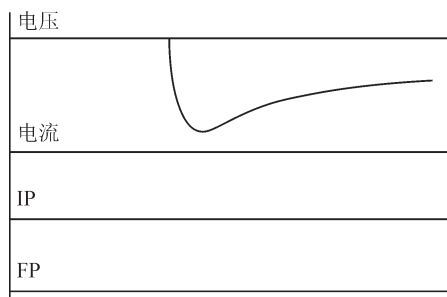


图10 反向耐压波形图

Fig. 10 Wave diagram of reverse impulse test

4 测试系统研制及实现

4.1 测试仪研制

测试仪主要由软件测试系统、微机监控单元、高速DSP数字控制单元、阻抗测试单元、低电压测试单元、高压测试单元、输出控制单元等组成^[12],系统框图见图11。

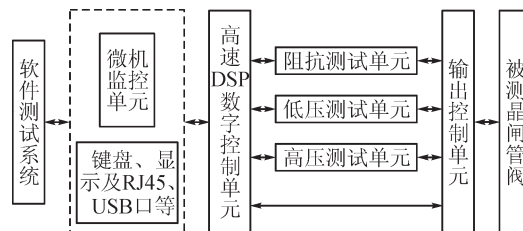


图11 测试仪系统架构图

Fig. 11 Framework of test device

阻抗测试单元采用变频回路产生直流以及不同频率的交流电压,通过放大电路使输出电压具有

一定幅值,可确保阻抗计算的精度;低压测试单元主要由工频变压器、限流电阻和相应的控制单元组成,除负责低压测试外,还配合高压测试单元完成部分高压测试项目;高压测试单元主要由直流整流电路、冲击电压发生电路和控制部分组成,并配合有相应的泄压保护电路,可精确输出指定幅值的冲击电压。

3大测试单元的输出通过一个输出控制单元进行切换,4个单元全部都由高速DSP数字控制单元进行控制,根据第3章所述各测试项目的需求,将相应的激励施加到被测晶闸管级上,并采集电压电流信号通过微机监控单元交由软件测试系统进行结果判断和显示。

4.2 VBE测试模式设计

根据第3章中各测试项目的试验波形,VBE在测试模式下的逻辑功能流程图见图12。

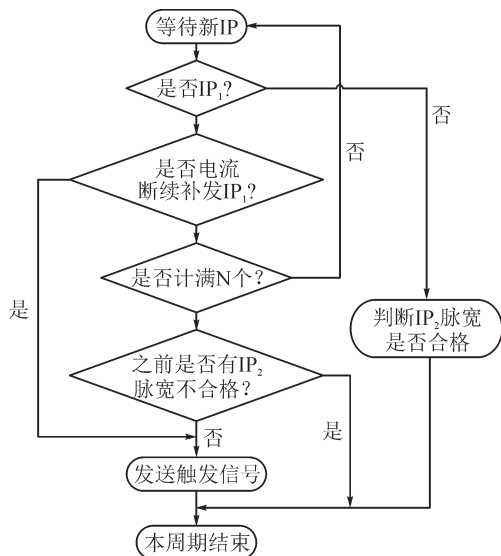


图12 VBE测试模式下功能逻辑流程图

Fig. 12 Flow diagram of VBE function under test mode

VBE无需知道当前正在进行哪个试验项目,仅根据接收到的IP的时序关系、数量和脉宽,便可决定是否发送FP。在上述功能逻辑下,VBE既可以配合测试仪进行单项测试,又可以实现所有测试项目一键式完成。

4.3 实测结果

将上述测试系统应用在直流换流阀上进行功能测试,测试现场见图13。

下面选取正向过电压保护测试项目对实际的试验效果进行说明。

正向过电压保护试验的波形图见图14。可以看到试验中分别经历了冲击电压前的正常导通、保护性触发导通、冲击电压后的正常导通,说明保护性触发功能正常,且回报的IP₂脉宽正确。



图13 测试现场图

Fig. 13 Picture of function test

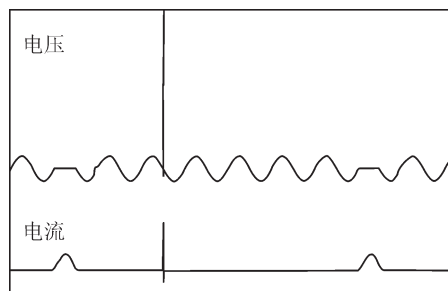


图14 正向过电压保护试验波形图

Fig. 14 Real test waveform of protection test of forward overvoltage

5 结语

文中通过分析现有晶闸管阀在现场测试时的缺陷,结合晶闸管级测试的特点,将VBE加入测试系统,通过其与测试仪之间的功能及时序配合,可以在不插拔工程运行光纤的情况下完成所有测试项目,有效地评估晶闸管级的各项功能和性能。将本测试系统应用在直流换流阀上的实测结果表明该测试系统设计合理,操作简单,测试仪和VBE配合良好可靠,满足工程现场的应用需求。

参考文献:

- [1] 江戈,岳珂,胡宇,等. TCU结构换流阀组件中晶闸管级例行试验方法研究[J]. 高压电器,2015,51(2):99-105.
JIANG Ge, YUE Ke, HU Yu, et al. Research on routine test of thyristor level with TCU on HVDC converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2):99-105.
- [2] 梁家豪,余海翔,杨苹,等. 一种VBE综合测试平台设计[J]. 高压电器,2015,51(1):67-74.
LIANG Jiahao, YU Haixiang, YANG Ping, et al. Design of comprehensive test platform for VBE[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1):67-74.
- [3] 刘朴,许钊,胡治龙,等. 高压直流换流阀断续电流试验方法研究[J]. 高压电器,2014,50(8):8-13.
LIU Pu, XU Fan, HU Zhilong, et al. Research of intermittent current test method for HVDC thyristor valves[J]. High

(下转第281页)

- lar MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(s1): 21-29.
- [13] 孔明, 汤广福, 贺之渊. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5343-5351.
- KONG Ming, TANG Guangfu, HE Zhiyuan. A DC fault ride-through strategy for cell-hybrid modular multilevel converter based HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5343-5351.
- [14] XIANG W, LIN W, WEN J, et al. Equivalent electromagnetic transient simulation model and fast recovery control of overhead VSC-HVDC based on SB-MMC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 778-788.
- [15] 李梦柏, 向往, 左文平, 等. 具备无闭锁穿越直流故障能力的直流自耦变压器[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 82-88.
- LI Mengbai, XIANG Wang, ZUO Wenping, et al. DC-DC autotransformer with uninterrupted operating capability during DC fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 82-88.
- [16] 胡灿, 付超, 王毅. 直流配电网中 MMC 的谐波分析与调制方法设计[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 81-88.
- HU Can, FU Chao, WANG Yi. Harmonic analysis and modulation method design of MMC in DC distribution network[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 81-88.
- [17] 管敏渊, 徐政, 潘伟勇, 等. 最近电平逼近调制的基波谐波特性解析计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1327-1332.
- GUAN Minyuan, XU Zheng, PAN Weiyong, et al. Analytical calculation of fundamental wave and harmonic characteristics for nearest level modulation[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1327-1332.
- [18] LI J, LI H, LIU C. The effects of voltage level number on operation characteristics of modular multilevel converter [C]//Applied Mechanics and Materials. Shanghai, China: [s.n.], 2014: 1902-1908.
- [19] MIGUEL M, Francisco H, INÉS S, et al. A comparison of modulation techniques for modular multilevel converters[J]. Energies, 2016, 9(12): 1091.
- [20] 张建坡, 赵成勇, 孙一莹, 等. 基于电压源换流器型直流输电拓扑结构和调制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1732-1738.
- ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, SUN Yiyong, et al. Research on topological structure and control strategy for voltage source converter-based direct current power transmission[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1732-1738.

高泽盟(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性输电技术与智能电网。

李卫国(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高电压与绝缘技术。

(上接第 273 页)

- Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 8-13.
- [4] 杨兴超, 张占营, 秦海晶, 等. 高压输电换流阀晶闸管控制单元电磁兼容测试方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 15-20.
- YANG Xingchao, ZHANG Zhanying, QIN Haijing, et al. EMC testing method research for thyristor control unit of HVC valve[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 15-20.
- [5] 查鲲鹏, 周万迪, 高冲, 等. 高压直流换流阀例行试验方法研究及工程实践[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 465-470.
- ZHA Kunpeng, ZHOU Wandu, GAO Chong, et al. Research on routine test of HVDC converter valve and its engineering practice[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 465-470.
- [6] 刘隆晨, 岳珂, 庞磊, 等. 高压直流输电换流阀晶闸管级单元综合测试系统设计与实现[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 756-761.
- LIU Longchen, YUE Ke, PANG Lei, et al. Design and implementation of synthetic test system for thyristor level of HVDC converter valve[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 756-761.
- [7] 祁招, 杨会磊, 胡子健, 等. 一种基于直流输电换流阀阀控设备的触发测试系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 125-129.
- QI Zhao, YANG Huilei, HU Zijian, et al. Design of automatic test system for triggering function of HVDC valve control equipment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 125-129.
- [8] 贺之渊, 汤广福, 朱家骝, 等. 电力电子装置高压阀的介质试验[J]. 高电压技术, 2005, 32(6): 75-78.
- HE Zhiyuan, TANG Guangfu, ZHU Jialiu, et al. Dielectric test of power electronics high voltage valve[J]. High Voltage Engineering, 2005, 32(6): 75-78.
- [9] Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission Part1: Electric testing: IEC 60700-1—2008[S]. 2008.
- [10] 高压直流输电用普通晶闸管的一般要求: GB/T 20992—2007[S]. 2007.
- [11] General requirements for thyristors for HVDC transmission: GB/T 20992—2007[S]. 2007.
- [12] LI Y, ZHANG Z, REHTANZ C, et al. Study on steady and transient state characteristics of a new HVDC transmission system based on an inductive filtering method[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2011, 26(7): 1976-1986.
- 杨帆(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事高压直流换流阀相关技术研究。
- 余振球(1964—), 男, 本科, 高级工程师, 从事高压直流输电相关技术研究。
- 张翔(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高压直流换流阀相关技术研究。