

灵宝扩建工程 6 英寸换流阀的设计和试验

查鲲鹏¹, 温家良¹, 王高勇¹, 杨晓楠¹, 周军川¹, 高冲¹,
David A Jackson²

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 2. AREVA 输配电集团, 英国 斯坦福德郡 ST174LN)

Design and Type-Test of 6-Inch Thyristor Valve for Lingbao Extension Project

ZHA Kunpeng¹, WEN Jialiang¹, WANG Gaoyong¹, YANG Xiaonan¹, ZHOU Junchuan¹, GAO Chong¹,
David A Jackson²

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China; 2. AREVA T&D, Stafford ST174LN, UK)

ABSTRACT: The design, insulation tests and operation tests of 6-inch thyristor valves applied in Lingbao extension project are presented respectively, and the topology of the testing circuit is given. The 6-inch thyristor valve that lifts the rated DC current to 4500 A, which is applied in Lingbao extension project in China, is the first engineering practice in the world. The design of DC thyristor valve is one of the key problems in HVDC power transmission project, and it directly impacts the secure and reliable operation of HVDC power transmission.

KEY WORDS: Lingbao extension project; 6-inch thyristor converter valve; dielectric test; operational test

摘要: 对灵宝扩建工程 6 英寸换流阀的设计、绝缘和运行试验进行了介绍, 并给出了试验电路拓扑。灵宝扩建工程是世界上首次基于 6 英寸晶闸管换流阀将额定直流电流提升至 4500 A 的工程实践。直流换流阀的设计是直流输电工程的关键技术之一, 直接影响工程的安全可靠运行。

关键词: 灵宝扩建工程; 6 英寸换流阀; 绝缘试验; 运行试验

0 引言

2007 年国家电网公司决定将灵宝扩建工程作为示范工程, 在世界上首次开展基于 6 英寸晶闸管换流阀将额定直流电流提升至 4500 A 的工程实践, 为超/特高压直流输电进一步提升容量作好技术储备。

灵宝扩建背靠背换流站位于正在运行的换流

站北侧, 与已有的换流站站址相连。扩建换流站工程本期直流系统额定容量为 750 MW, 建设 1 个背靠背直流单元, 额定输送功率为 750 MW, 额定直流电压为 166.7 kV, 额定直流电流为 4500 A。投运后西北与华北的联网规模为 1120 MW。远期可再扩建 1 个单元, 届时西北与华中中间联网规模将达到 1880 MW^[1]。

扩建灵宝背靠背换流站西北网侧本期有 3 回 330 kV 交流出线, 远期有 5 回。本期灵宝换流站西北侧通过 2 回 120 km 的 330 kV 线路与渭南东开关站相连, 另通过 1 回 330 kV 线路与老换流站相连, 预留 2 回备用。扩建换流站华中侧本期有 1 回 40 km 的 500 kV 交流出线与三门峡变电站相连, 预留 1 回备用。即西北侧新、老换流站换流母线相连, 华中侧不连。换流站主电路见图 1 所示^[1], 图中 V 为单阀。

该工程在世界上首次将直流额定电流提升到 4500 A, 技术难点多, 研制和试验难度大。

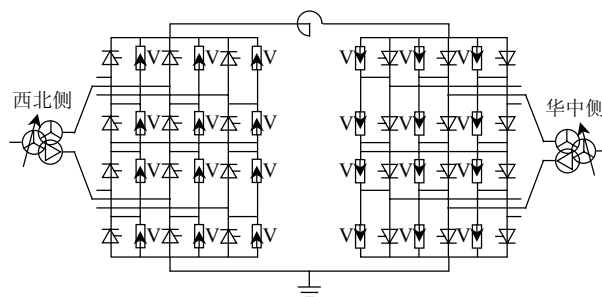


图 1 灵宝换流站主电路拓扑

Fig. 1 Topological structure of main converter station for Lingbao extension project

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677064)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50677064).

1 6英寸换流阀的设计

灵宝背靠背联网扩建工程换流站每侧为1个完整单级,即1个12脉桥换流器由3个空气绝缘、水冷却、悬吊式4重阀构成。每阀3个模块,每个4重阀共12个模块。每个单阀由33个晶闸管与6台饱和电抗器串联组成,其中包含2个冗余晶闸管^[1-2]。换流阀中使用6英寸电触发晶闸管,额定电流4500 A、额定电压7.2 kV,芯片直径134 mm。换流阀模块电气回路主要包括与晶闸管元件并联的2个RC阻尼回路和DC均压电阻以及与晶闸管组件串联的饱和电抗器。

晶闸管触发、监视工作由位于换流阀上的门极单元(gate unit, GU)和位于地电位的阀基电子设备(value base electronics, VBE)共同完成。每个晶闸管级配置一个GU;每个GU和对应的VBE通过2根光纤完成通信,其中,一根用于VBE向GU传送触发数据,另一根用于GU向VBE传送监视信息^[2]。

为了防止冷却系统在较低的外部环境温度下发生结冻现象,灵宝工程冷却介质选用去离子水和乙二醇的混合物^[2]。晶闸管与散热片的接触面使用高导热性材料,能保证较好的散热接触。电抗器铁心的损耗通过环氧树脂和管型线圈的导热,最后由流经空心绕组的冷却水带走,确保铁心任何情况下都能得到充分冷却。每个晶闸管级并联1个直流均压电阻和2个阻尼支路,直流均压电阻固定在晶闸管的散热器上。阻尼电路采用间接冷却的方式,即阻尼电路固定在1个专门设计的散热器上。阀组件结构如图2所示。

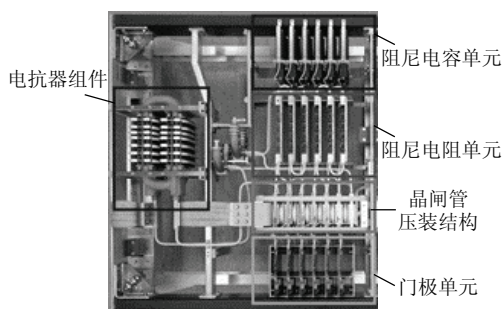


图2 阀组件结构

Fig. 2 Assembly of valve components

2 电力系统电力电子实验室

为了提高电力系统电力电子实验室的试验能力,中国电科院建立了新的5900 m²实验室。该实验室有2个试验大厅,54 m×27 m×16 m的试验大

厅主要完成FACTS高压阀和特高压直流阀的运行试验,54 m×44 m×30 m的试验大厅主要用来完成特高压直流阀的绝缘实验。实验室中有1个专门用于多重阀单元组装的悬挂系统,最大承重为40 t。实验室的接地电阻是0.283 Ω,对于100 kHz~100 MHz的信号屏蔽效率大于55 dB。实验室的布置及外观分别见图3、4。



图3 高压实验室布置

Fig. 3 The layout map of the high-voltage power electronic laboratory (HPEL)



图4 实验室外观

Fig. 4 The appearance of the HPEL

电力系统电力电子实验室主要绝缘和运行试验能力列于表1所示。

表1 直流阀的试验设备及参数

Tab. 1 Devices for HVDC thyristor valve test and their parameters

特高压直流阀试验设备	关键参数
合成试验设备(包括故障电流试验)	80 kV(峰值), DC 5 000 A, 55 kA(峰值)故障电流
低电压运行试验设备 (包括恢复期间正向电压)	20 kV(峰值), DC 4 000 A, 结合 300 kV, 7.5 kJ 冲击发生器
交流电压试验设备	600 kV, 5 A
直流电压试验设备	±2 400 kV, 0.3 A
冲击电压试验设备 (包括非周期触发试验)	3.6 MV, 450 kJ, 最大电压陡度 $du/dt > 1\ 200$ kV/ μ s
局部放电测量系统 AC/DC 电压	—

电力系统电力电子实验室能够满足FACTS高功率阀以及基于6英寸晶闸管的±800 kV特高压换流阀所有试验要求,并可为大功率阀提供试验能力、技术和研发能力,从而为特高压直流输电工程的实施奠定基础。

3 型式试验项目及其必要性

换流阀的型式试验是检验换流阀设计的重要部分。其中绝缘试验可以检验阀支架相关绝缘件的电压耐受能力、多重阀单元的外绝缘和单阀之间电

压耐受能力、单阀的电压特性设计是否合理等。运行试验可以检验换流阀在各种运行条件下的运行性能^[3-7]。

根据文献[4]和灵宝扩建背靠背换流站工程的技术规范，阀型式试验分为：绝缘试验和运行试验。此次灵宝工程换流阀型式试验的项目见表 2 所示^[8]。

表 2 绝缘及运行试验项目

Tab. 2 Items of insulation tests and operation tests

绝缘试验项目	运行试验项目(阀组件)
阀支架直流耐压试验	最大持续触发电压试验和 最大持续恢复电压试验
阀支架交流耐压试验	最大暂态运行负载试验($\alpha=90^\circ$)
阀支架雷电冲击试验	最小延迟角试验
多重阀直流耐压试验	最小关断角试验
多重阀操作冲击试验	暂态欠电压试验
多重阀雷电冲击试验	断续直流电流试验
多重阀陡波冲击试验	恢复期间暂态正向电压试验
单阀直流耐压试验	故障电流试验
单阀交流耐压试验	—
单阀操作冲击试验	—
单阀雷电冲击试验	—
单阀陡波冲击试验	—
单阀湿态直流耐压试验	—
单阀湿态操作冲击试验	—
单阀非周期触发试验	—

表 2 中所列部分项目比文献[4]规定的试验项目更为严格且试验项目有所增加，这些项目主要是为了更严格和全面地考察换流阀的各种电气性能。电力系统电力电子实验室除完成文献[4]标准规定的试验项目外，还根据招标书规定的要求完成了如下新增加的试验项目：

- 1) 阀雷电冲击试验(热阀)。
- 2) 阀陡波前冲击试验(热阀)。
- 3) 阀湿态操作冲击试验。
- 4) 阀湿态直流电压试验。

其中阀雷电、陡波冲击试验要求在施加冲击电压前对阀进行加热，使其结温达到短期过负荷运行方式的最高运行温度(90℃)。由于晶闸管的瞬时电压耐受能力随结温的升高而降低，因此试验比标准更为严格地考核了换流阀的电气性能。

阀湿态直流电压和操作冲击电压试验要求在试验开始前 1h 将冷却液滴在阀塔上，使阀整体湿润^[1]。此两项试验是为了模拟实际运行中若在阀结构顶部的 1 个组件发生冷却液体少量泄漏情况时，换流阀仍能正常运行。此试验的通过，增加了阀运行的可靠性和稳定性。

本次换流阀试验均是严格按照招标书要求进行，各项指标均达到或超过文献[4]规定的试验要求。

4 型式试验的实施

4.1 试验对象

为满足灵宝扩建工程换流阀对试验对象的需要，自主设计的阀塔成套吊装系统及吊装平台，保证了换流阀的顺利吊装。并且此次吊装完全按照特高压换流阀绝缘型式试验的要求进行，吊装高度达 30m，从而为特高压工程绝缘型式试验奠定了基础。吊装完成后的阀塔外形如图 5 所示。



图 5 换流阀阀塔外观

Fig. 5 The appearance of the valve tower

根据试验项目的不同，绝缘试验在阀悬吊结构、1 个完整的 4 重阀塔上或者 1 个单阀上进行。1 个完整的阀塔主要由 12 个阀模块及其屏蔽罩、冷却管路、电缆、光纤连接件等组成。其中有 4 个阀模块为许继组装完成。3 个阀模块构成试品阀，另外 3 个组成 1 个用于验证试品阀在运行时能免受邻近阀干扰的辅助阀。阀的布置还包括顶部、中部和底部应力罩、滴漏盘以及避雷器外套。

运行试验在 1 个阀组件或者 1 个阀模块上进行，阀组件包括由 5 个或 6 个 7.2kV、5 英寸晶闸管组成的压装结构、阻尼回路、门极单元、饱和电抗器及冷却系统，阀模块外观图如图 6 所示。

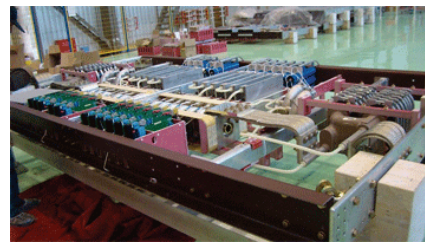


图 6 换流阀模块外观

Fig. 6 The appearance of the valve module

4.2 型式试验

4.2.1 绝缘试验

绝缘试验根据试验对象的不同分为阀支架绝缘试验、多重阀单元绝缘试验和单阀绝缘试验。下面将按照不同的试验对象分别进行介绍。

阀支架绝缘试验电路如图 7、8 所示，此试验较为简单，进行此试验时需将换流阀元件全部短

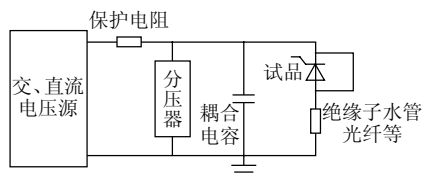


图 7 阀支架交、直流耐压试验电路

Fig. 7 Circuit of AC and DC withstand voltage tests for valve support

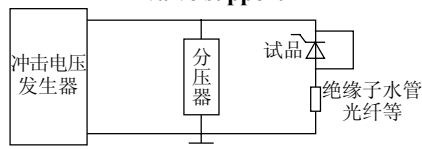


图 8 阀支架冲击电压试验电路

Fig. 8 Circuit of lightning impulse voltage test for valve support

接，将电源接至阀塔高电位端上即可进行交、直流和冲击试验。

多重阀单元绝缘试验包括直流耐压试验和冲击电压试验，其中冲击电压试验又分为操作、雷电、陡波前冲击电压试验。为了模拟最严酷的试验情况，试验时需短接 1 个单阀，只对 3 个单阀进行试验。

进行直流电压试验时需将电源用无晕导线接至阀塔高电压端，即可进行直流耐压试验，试验电路如图 9 所示。

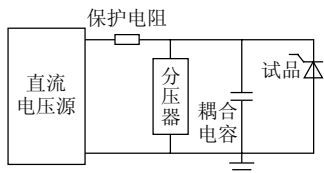


图 9 多重阀单元直流耐压试验电路

Fig. 9 Circuit of DC withstand voltage test for multi-valve unit

冲击试验电路如图 10 所示。其中进行操作冲击试验、负极性雷电和负极性陡波冲击试验时，图 10 中交流补能源不接入电路中。为了保护晶闸管不受损伤，在对阀进行正极性雷电和陡波冲击试验时要求阀电子单元在试验时必须带电。因此进行雷电和陡波冲击试验时牵涉到冲击电源和补能电源的配合问题，需在电路中接入球隙和开关分别保护 2 个电源不相互影响。进行雷电和陡波冲击试验时需先闭合开关，使用交流补能源对阀进行补能，补能完成后断开开关才可施加冲击电压。

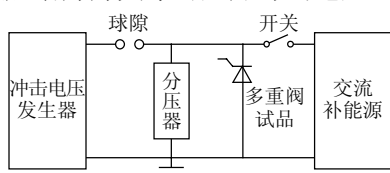


图 10 多重阀单元冲击电压试验电路

Fig. 10 Circuit of impulse voltage test for multi-valve unit

单阀绝缘试验包括直流耐压试验、交流电压试验、冲击电压试验、非周期触发试验、湿态直流耐压试验和湿态操作冲击试验，其中冲击电压试验又分为操作、雷电和陡波冲击电压试验。进行直流耐压试验、交流电压试验、冲击电压试验时需短接 4 重阀塔上的 3 个单阀和试品阀中的冗余晶闸管，模拟单阀失去冗余的工况下仍能正常运行。

进行交、直流电压试验时需将电源用无晕导线接至阀塔高电压端，即可进行交、直流电压试验，试验电路如图 11 所示。

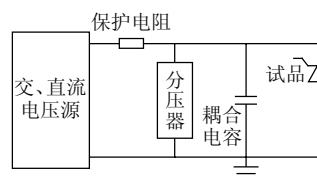


图 11 单阀交、直流耐压试验电路

Fig. 11 Circuit of AC/DC withstand voltage tests for single valve

对单阀进行冲击试验时同样牵涉到冲击电源和补能电源的配合问题，需在电路中接入球隙和开关保护冲击和补能电源，试验电路如图 12 所示。对阀进行雷电和陡波冲击试验时，为满足招标书对阀加热的要求，此次灵宝试验采用了水加热的方式。试验时首先将水温升至要求的温度，之后闭合开关对阀进行补能，补能完成后断开开关对阀进行雷电(陡波)冲击试验。进行操作冲击试验时不需要对阀进行加热。

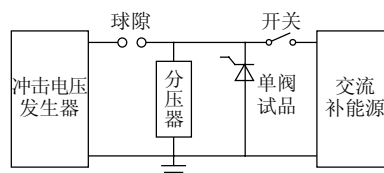


图 12 单阀冲击电压试验电路

Fig. 12 Circuit of impulse voltage test for single valve

非周期触发试验中还需要 1 个辅助阀进行电磁干扰试验，在阀非周期触发的触发时刻，辅助阀应具有正向偏置电压，试品阀和辅助阀的电子设备应加电。试验原理如图 13 所示，此试验牵涉到冲击电源、补能电源 U_1 、和补能电源 U_2 和 VBE 4 个试验设备的配合，因此试验是绝缘试验中的难点。此次非周期触发试验采取的是文献[4]规定的电容器法，整体试验使用 1 个大电容模拟避雷器的放电。进行试验时首先将开关闭合，使用 2 个补能源对试品阀和辅助阀进行补能，在补能完成且辅助阀处于正向偏置电压下时，断开开关给阀施加操作冲击，在阀上操作电压到达峰值时刻触发试品阀。

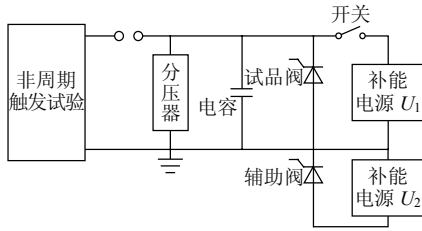


图 13 单阀非周期触发试验电路

Fig. 13 Circuit of aperiodic firing test for single valve

根据招标文件的要求，此次灵宝试验又增加了阀的湿态直流耐压试验和湿态操作冲击试验，试验电路、步骤与直流耐压和操作冲击试验时基本一致，进行直流耐压试验时，只需将文献[4]第 8.3.1 款中的 3 h 试验改为 5 min 试验。此 2 项试验是为了模拟实际运行中，若在阀结构顶部的 1 个组件发生冷却液体少量泄漏的情况时，换流阀仍能正常运行。此次试验设置冷却液泄漏量为 15 L/h，应至少 1 h 之后施加直流试验电压和操作冲击电压。

4.2.2 运行试验

运行试验是检验高压换流阀设计的重要部分，此次运行试验采用合成试验设备来完成。合成试验设备(包括故障电流试验)可以检验 HVDC 阀在各种运行条件下的运行性能，例如稳态、过载、高触发角、短路等^[9-15]。

此次运行试验共进行了最大持续触发电压试验和最大持续恢复电压试验、最大暂态运行负载试验($\alpha=90^\circ$)、最小延迟角试验、最小关断角试验、暂态欠电压试验、断续直流电流试验、恢复期间暂态正向电压试验和故障电流试验，试验波形如图 14—21 所示。

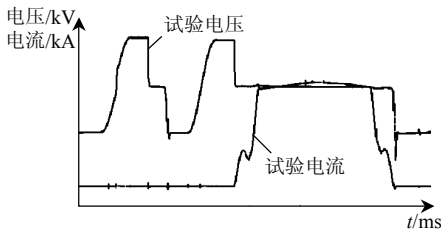


图 14 最大持续触发和恢复电压试验波形

Fig. 14 Test waveforms of maximum persistent firing voltage and recovery voltage

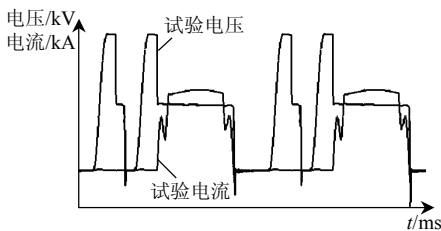


图 15 最大暂态运行负载试验($\alpha=90^\circ$)波形

Fig. 15 Waveform of temporary operation of maximum load test under $\alpha=90^\circ$

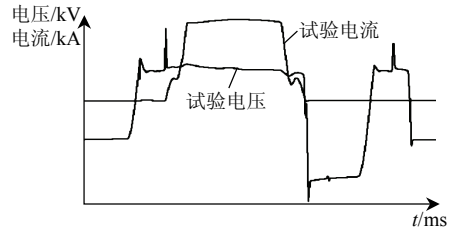


图 16 最小延迟角试验波形

Fig. 16 Waveform of minimum delay angle test

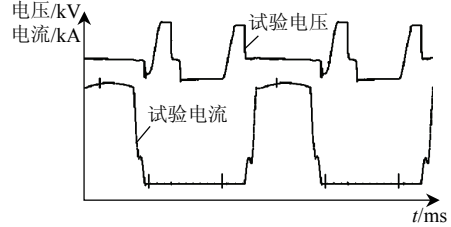


图 17 最小关断角试验

Fig. 17 Waveform of minimum extinction angle test

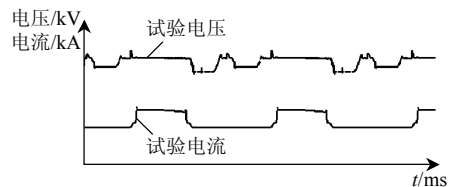


图 18 暂态欠电压试验波形

Fig. 18 Waveform of temporary undervoltage test

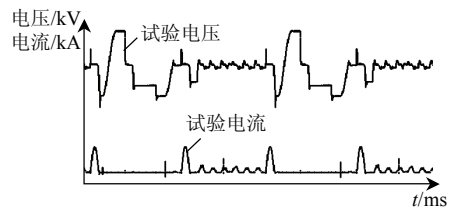


图 19 断续直流电流试验波形

Fig. 19 Waveform of intermittent direct current test

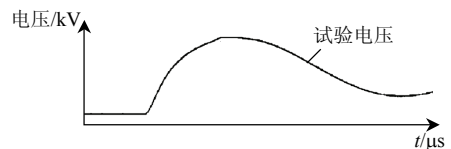


图 20 恢复期间暂态正向电压试验波形

Fig. 20 Waveform of transient forward voltage test during recovery period

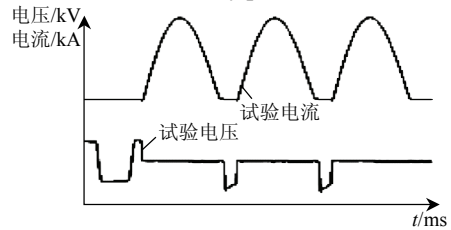


图 21 故障电流试验波形

Fig. 21 Waveform of fault current test

5 结论

本次灵宝扩建工程换流阀顺利通过所有型式试验，试验的各项指标均达到或超过文献[4]规定的试验要求。

灵宝扩建工程是世界上首次开展基于6英寸晶闸管提升至4500A换流阀的工程,对试验回路及设备的要求高、技术难点多、试验难度大。试验的顺利完成,为进行超/特高压直流工程换流阀的型式试验奠定了基础。此次灵宝扩建工程的顺利完成,为今后特高压采用基于6英寸4500A及以上直流换流阀奠定了实践和工程基础。

参考文献

- [1] 网联直流工程公司. 西北—华中联网背靠背灵宝扩建换流站设备换流阀(西北侧)技术协议[R]. 北京: 网联直流公司, 2007.
- [2] Areva Engineering Report. Thyristor valve design description Lingbao II BtB-7.2kV/6" thyristor option[R]. Stafford of England: AREVA T&D UK Ltd, 2008.
- [3] GB/T 20990.1—2007 高压直流输电晶闸管阀 第一部分: 电气试验[S].
- [4] IEC 60700—1 Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission, part 1: electrical testing[S].
- [5] 崔东, 冯建强, 贾涛, 等. ± 500 kV HVDC 换流阀冲击试验技术[J]. 电力设备, 2006, 7(3): 30-32.
Cui Dong, Feng Jianqiang, Jia Tao, et al. ± 500 kV HVDC valve impulse test[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(3): 30-32(in Chinese).
- [6] 查鲲鹏, 温家良, 高冲, 等. 特高压直流换流阀试验能力建设[C]//2009 特高压输电技术国际会议. 北京: 国家电网公司, 2009: 500-504.
- [7] Bauer T, Lips H P. Operational tests on HVDC thyristor modules in a synthetic test circuit for the sylmar east restoration project[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1151-1158.
- [8] IEC 61954 Testing of thyristor valves for static VAR compensators [S].
- [9] Areva Engineering Report. Periodic firing and extinction type tests [R]. Stafford, UK, 2009.
- [10] Areva Engineering Report. Fault current suppression test[R]. Stafford, UK, 2009.
- [11] 中国电力科学研究院. 向家坝—上海 ± 800 kV 直流输电工程晶闸管换流阀设计报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [12] 温家良, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 高压晶闸管阀运行试验方法与试验装置的研究与开发[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 26-31.
Wen Jialiang, Tang Guangfu, Zha Kunpeng, et al. Operational test method of high voltage thyristor valves and development of its synthetic test equipment[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 26-31(in Chinese).
- [13] 周会高, 许钊, 黄超, 等. 特高压直流输电换流阀运行试验合成回路研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 158-163.
Zhou Huigao, Xu Fan, Huang Chao, et al. Research of synthetic test circuit for operational test of UHVDC thyristor valve[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 158-163 (in Chinese).
- [14] 温家良, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 高压晶闸管阀复合“全工况”试验装置的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 38-43.
Wen Jialiang, Tang Gangfu, Zha Kunpeng, et al. Investigation on synthetic test equipment for high voltage thyristor valves[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 38-43 (in Chinese).
- [15] 盛宝良, Jansson E, Blomberg A, 等. 用于 HVDC 晶闸管模块运行试验的新合成试验回路[J]. 高压电器, 2002, 38(5): 1-4.
Sheng Baoliang, Jansson E, Blomberg A, et al. A new synthetic test circuit for the operational test of HVDC thyristor modules[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(5): 1-4(in Chinese).



查鲲鹏

收稿日期: 2010-04-20。

作者简介:

查鲲鹏(1977), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事灵活交流输电试验方法和直流输电试验技术的研究, E-mail: zhakp@epri.sgcc.com.cn;

温家良(1971), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事

灵活交流输电试验方法和直流输电技术的应用研究;

王高勇(1983), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事直流输电试验技术的研究;

周军川(1976), 男, 学士, 工程师, 主要从事高压电力电子阀的试验方法研究及试验项目实施;

高冲(1982), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事直流输电试验技术的研究;

David A Jackson(1971), 男, 高级工程师, 主要从事灵活交流输电和直流输电工程技术的研究。

(编辑 张磊)