

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.013

柔性直流输电换流阀功率单元现场测试方法研究

蔡明¹, 林寰², 廖其艳³, 马广福³, 陈冰⁴

(1. 广东电网有限责任公司, 广州 510620; 2. 广东电网有限责任公司汕头供电局, 汕头 515041;
3. 荣信电力电子股份有限公司, 鞍山 114000; 4. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]在柔性直流输电工程中,换流阀功率单元及其备件需要定期进行测试和维护。功率单元工作正常是保证柔性直流输电系统安全稳定运行的重要前提。[方法]针对功率单元现场测试缺乏相关规范标准的现状,从功率单元的结构、工作机制和厂内测试项目入手,结合现场实际情况,提出了一种适用于现场的流程化的功率单元测试方法,并在该方法的基础上研制了一台可对功率单元进行自动测试的装置。[结果]所提出的测试方法和测试装置可有效提高功率单元现场测试的完备性、效率及准确性,该装置目前已在南澳多端柔性直流输电工程塑城换流站试点应用。[结论]工程实践表明:提出的测试方法贴近工程实际情况,为功率单元的运检、验收提供了有效的测试手段,也可对其他柔性直流输电工程的功率单元测试工作提供借鉴。

关键词: 功率单元; 现场测试方法; 测试装置; 自动测试

中图分类号: TM7; TM46

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)02-0070-07

Research on on-Site Test Method for Flexible HVDC Converter Valve Power Module

CAI Ming¹, LIN Huan², LIAO Qiyuan³, MA Guangfu³, CHEN Bing⁴

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Shantou Power Supply Bureau, Shantou 515041, China;

3. Rongxin Power Electronic Co., Ltd., Anshan 114000, China;

4. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] In flexible HVDC transmission systems, HVDC converter valve power modules and their spares are tested and maintained at regular intervals. The power modules in good condition are essential to assure the safe and steady operation of flexible HVDC transmission systems. [Method] Firstly the structure, working mechanism and shop test items of power modules were analyzed in view of the shortage of relevant specifications and standards for power modules on-site test. Then a power module test method suitable for actual situation on site was proposed. Based on the proposed method, a device able to test power modules automatically was developed. [Result] The proposed test method and device effectively improve the completeness, efficiency and accuracy of power module on-site test, which is applied in Sucheng converters station of Nan'ao multi-terminal HVDC flexible system. [Conclusion] The engineering practice indicates that the proposed method provides an effective way for the power module test tasks during the phase of operation, maintenance and inspection, which is close to the actual test situation on site. Moreover, the proposed method and device provide a reference for the power module test tasks of other flexible HVDC transmission systems.

Key words: power module; test method on site; test device; automatic testing

基于 MMC-HVDC 的柔性直流输电技术, 因其

采用完全一致的模块化级联方案, 在研发、制造、动态和静态均压、后期维护等方面相对于常规直流技术具有显著的优势, 在国内外受到广泛的关注^[1]。国内已投运的南澳多端柔性直流输电示范工程、舟山多端柔性直流输电工程、云南鲁西背靠背

收稿日期: 2019-05-14 修回日期: 2019-06-03

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目“大功率柔性直流输电换流阀功率单元模块测试装置技术研究”(GDKJQQ20161108)

直流输电工程, 采用的都是 MMC-HVDC 输电技术。

目前国内外对柔性直流输电技术的研究主要集中在 MMC-HVDC 拓扑结构、控制算法、仿真建模、故障机制、试验系统等方面^[2-9], 鲜有对功率单元测试技术特别是现场测试技术方面的研究。在实际工程应用中, 各换流站所用到的功率单元数量多达数百至上千个, 投运后不可避免的会出现故障现象。功率单元故障后会被旁路退出运行, 待停电检修时统一进行更换。在换流站停电检修期间, 运维人员需要对故障的功率单元以及更换的新功率单元进行检测。此外, 根据新颁布的《换流站检修规程》, 柔性直流换流站每年在停电检修期间还需要对换流阀一个桥臂的功率单元进行抽检。因此每个换流站在年度停电检修期间均需要对数百个功率单元进行测试, 测试任务繁重。

目前, 对于功率单元的现场测试项目及测试要求还没有形成统一的规范和标准。一些运维人员仅通过对功率单元的电容进行充电来判断功率单元状态是否正常, 测试内容不够充分完备, 给柔直输电系统的可靠稳定运行带来了一定的隐患。

本文从功率单元的结构、工作原理和厂内测试项目入手, 结合现场实际情况, 确定了为满足功率单元可靠稳定运行要求必需的现场测试项目, 并将这些测试项目整合成一个流程化的功率单元现场测试方法, 从而提高了功率单元测试的效率和完备性。在本文提出的现场测试方法的基础上, 我们研制了一台功率单元测试装置, 可实现功率单元的自动测试, 进一步提高了测试效率和准确性。

1 功率单元的结构及工作机制

1.1 功率单元结构

功率单元是换流阀的最小构成单位, 也是一个集合了自动控制、电力电子、结构机械等技术的独立系统。功率单元由电容器、阀串、控制单元和旁路接触器等组成, 其结构如图1所示。其中, 阀串主要包含 IGBT、二极管、晶闸管等功率器件。控制单元则主要由高位取能电源、驱动板、驱动板电源、采样板、单元主控板等构成。

1.2 功率单元工作机制

在模块化多电平换流技术中, 电容器与开关器件被视为一个整体来构建功率单元, 通过功率单元

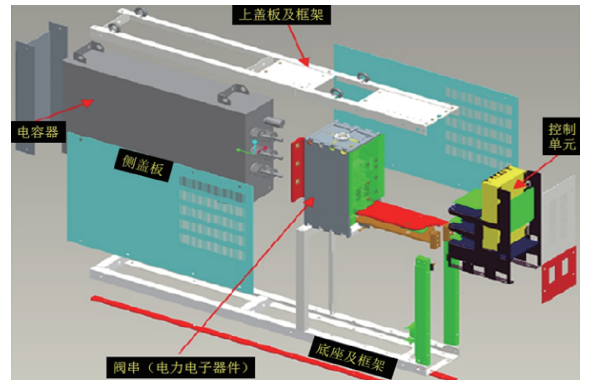


图1 功率单元三维结构示意图

Fig. 1 Three-dimensional structure diagram of power module

串联提升换流器的电压及功率等级, 易于扩展到任意电平输出。功率单元共有闭锁、投入、切除三种工作状态, 如图2所示。

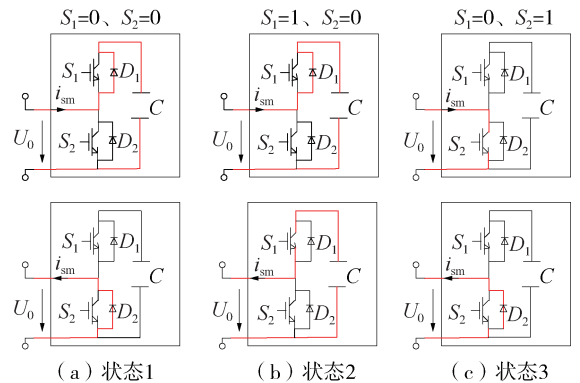


图2 功率单元工作状态

Fig. 2 Operating states of power module

取电流 i_{sm} 流入功率单元的方向为正。

1) 当功率单元上 IGBT 管 S_1 , 下 IGBT 管 S_2 均关断时, 子模块处于闭锁状态, 如图2(a)所示。当电流 $i_{sm} > 0$ 时, 电流通过上二极管 D_1 向电容充电, 当电流 $i_{sm} < 0$ 时, 电流经过下二极管 D_2 流出, 对电容电压无影响, 这两种闭锁状态一般在充电或故障状态下使用。

2) 当上 IGBT 管 S_1 开通、下 IGBT 管 S_2 关断时, 此时子模块处于投入状态, 如图2(b)所示。当电流 $i_{sm} > 0$ 时, 电流通过上二极管 D_1 向电容充电, 当电流 $i_{sm} < 0$ 时, 电流通过 S_1 对电容进行放电。

3) 当上 IGBT 管 S_1 关断、下 IGBT 管 S_2 开通时, 子模块处于切除状态, 如图2(c)所示。当电流 $i_{sm} > 0$ 时, 电流通过 S_2 流出, 电流对电容电压

无影响,当电流 $i_{sm} < 0$ 时,电流通过 D_2 流出,电流对电容电压无影响。

2 功率单元厂内测试项目

2.1 功能试验

为验证功率单元各电气部件的状态,以及相关控制和保护逻辑。需要对功率单元做基本的功能试验,试验内容主要包括目视检验、低压测试和高压测试三个部分,具体测试内容如图3所示。

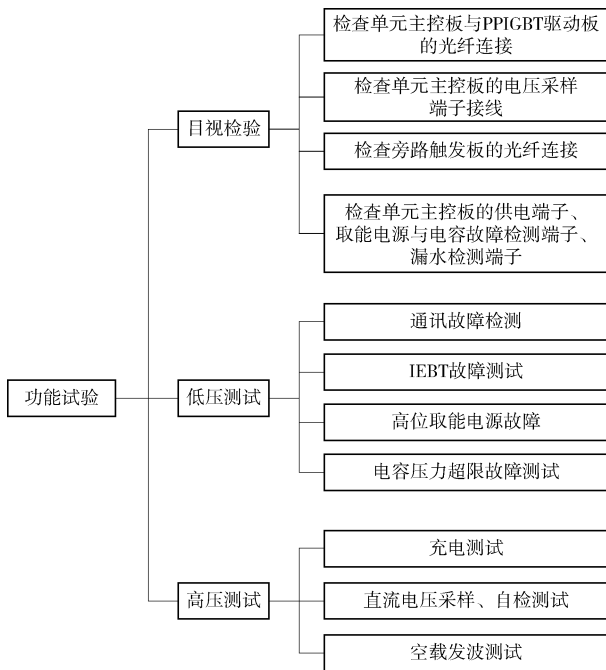


图3 功率单元功能测试项目

Fig. 3 Items of functional testing of power module

2.2 换流试验

换流试验主要用来记录 IGBT 和二极管在换流过程中的动态开关波形,通过测试和评估在不同的门极驱动板、不同的外部门极电阻和门极电容组合、甚至在不同门极驱动板的放置位置情况下的器件开关波形,从而达到优化门极电路设计甚至功率单元器件串设计的目的。

2.3 热稳定试验

热稳定试验是用于验证功率单元是否能够稳定运行在预定的负载电流,从而验证功率单元的载流能力的试验,也可以用来评估半导体器件在高结温下的换流情况。

在测试过程中,被测功率单元的两个 IGBT 的两个电极面都安装有温度传感器来监测温度,另外

功率单元的冷却液进出口分别都安装有温度、流量和压力传感器,通过这些传感器测量到的信号,就可以计算出功率单元在任意负载电流下的损耗和 IGBT 平均结温。

2.4 短路保护试验

短路保护试验主要用于验证 IGBT 的短路电流关断能力和门极驱动电路的检测及保护功能,是型式试验中必要的测试项目。

短路保护试验一般采用双脉冲测试法^[10]。如图4所示,使用直流电源给子模块充电,将下 IGBT 管 S_2 的集电极和发射极短接以模拟下 IGBT 管短路。随后将上 IGBT 管 S_1 触发导通,检查当 S_1 的集电极发射极间电压 U_{ce} 过高时,门极驱动板能否向门极发出关断信号并成功关断电流,以验证其抗短路能力。

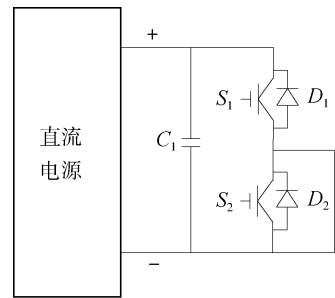


图4 IGBT 双脉冲测试

Fig. 4 IGBT double-pulse test

3 功率单元现场测试项目

功率单元的现场测试主要是在功率单元运输和安装后的验收、功率单元投运后的定期检查以及故障诊断等场景下进行。在这些测试场景中,功率单元的热稳定能力和抗短路能力只有极低的概率会发生变化,而功率单元换流试验主要在功率单元的设计阶段开展,因此在现场测试中我们应重点关注功率单元的功能测试。根据厂内各项功能测试对功率单元稳定运行的重要程度,我们对其进行筛选和梳理,并将功率单元现场测试流程整合为充电试验、运行试验、放电试验三个阶段,具体测试流程如图5所示。

正常运行过程中如果功率单元出现故障,其旁路接触器会吸合,功率单元通过内置电阻进行放电。在这种情况下功率单元被旁路,运维人员无法开展后续的现场测试工作。因此在现场测试开始

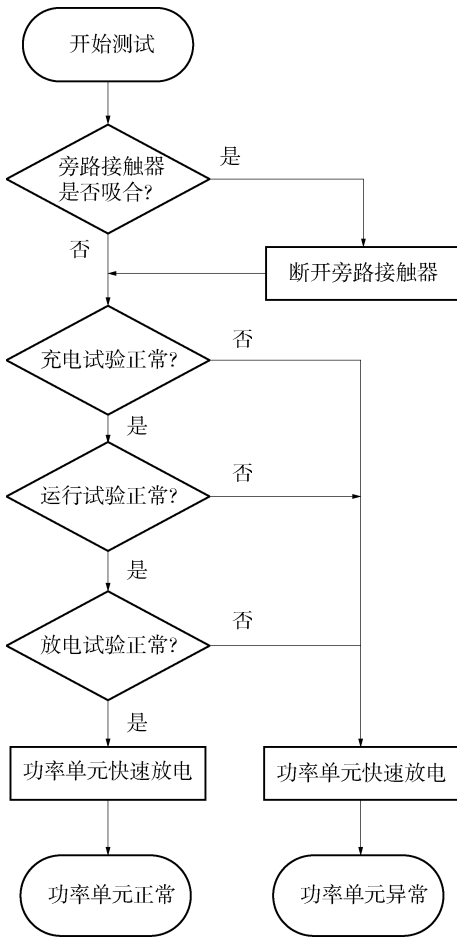


图 5 功率单元现场测试流程

Fig. 5 On-site testing process of power module

前, 运维人员应检查旁路接触器是否吸合。如果旁路接触器吸合应先将其断开再继续测试工作。

功率单元充电前, 应将其与测试设备及辅助设备连接。用辅助充电设备连接功率单元电容正、负极, 将功率单元控制器通过光纤连接到功率模块, 笔记本电脑与功率单元控制器通过网线连接进行功率单元状态控制, 用示波器对功率模块输出母线电压和电容电压进行采样, 功率单元控制器连接示波器读取电压采样数据。具体测试接线如图 6 所示。

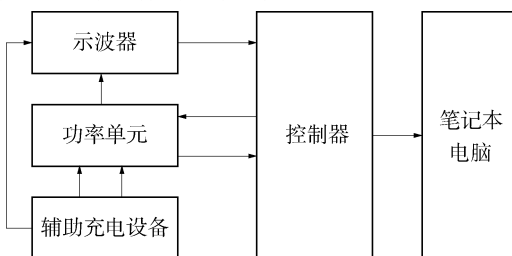


图 6 功率单元现场测试接线

Fig. 6 Wire connection for power module on-site test

3.1 充电试验

在完成测试接线后, 辅助充电设备对功率单元进行充电。在取能电源正常工作之前, 单元主控板处于未上电状态, 此时控制器会上报取能电源故障和通讯故障。当取能电源正常工作后, 单元主控板得电, 控制器开始给单元主控板下发配置命令, 配置完成后, 单元主控板上报配置完成, 并在收到复位命令后, 清除相应故障信息。待功率单元充电至预定电压值后, 充电完成。如果功率单元状态正常则进入下一阶段的测试。

在充电过程中, 功率单元应完成以下测试项目:

1) 充电时间判断

用于判断充电回路是否正常。当充电过慢时, 控制器报“充电故障”。充电时间是否正常的具体判据图 7 所示。

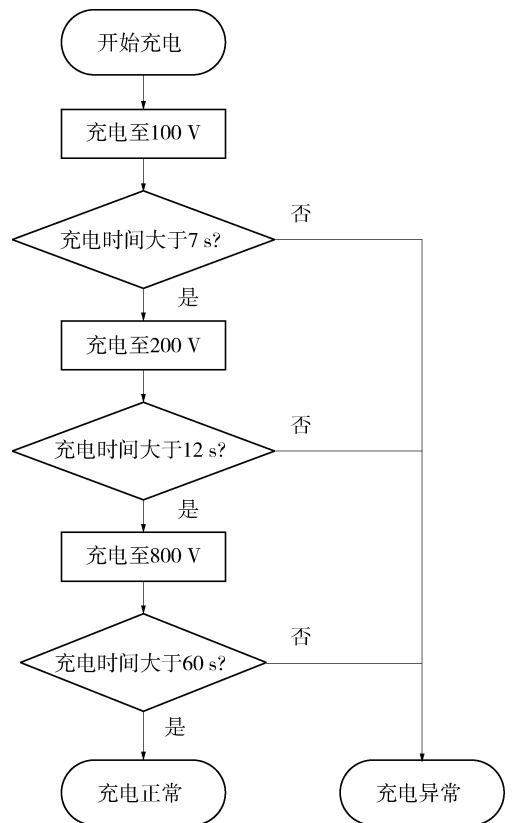


图 7 功率单元充电时间判断

Fig. 7 Evaluation of charging time of power module

2) 模块闭锁状态判断

在闭锁状态下上、下管 IGBT 电压应基本一致, 满足:

$$U_{dc_Fbk} > 400 \text{ V} \quad (1)$$

$$(2 \times U_{ac_Fbk} - U_{dc_Fbk}) > 100 \text{ V} \quad (2)$$

式中： U_{dc_Fbk} 为辅助充电设备输出电压； U_{ac_Fbk} 为功率单元输出电压；当 U_{dc_Fbk} 、 U_{ac_Fbk} 不满足公式(1)和公式(2)时，控制器报“闭锁状态异常”。

3) 模块采样数据误差判断

当单元主控板上电容电压 U_{dc_Upl} 与辅助充电设备输出电压 U_{dc_Fbk} 偏差过大，不满足公式(3)时，控制器报“单元电压采样异常”。

$$|U_{dc_Upl} - U_{dc_Fbk}| > 100 \text{ V} \quad (3)$$

4) 功率单元故障检测，功率单元在配置完成后，充电过程中如果报出故障信息，控制器报“功率单元异常”。

5) 取能电源故障检测

功率单元一般采用高位取能电源供电，功率器件并联的电容器充电至一定电压后，取能电源才能给单元主控板正常供电，并与上级系统建立通讯。功率单元在充电试验过程中，会对取能电源故障进行检测，在单元主控板得电正常工作后，会上报取能电源状态信息，如果取能电源故障，控制器报“取能电源异常”。

6) 单元通讯状态检测

测试装置在对功率单元进行测试过程中，能实时检测以下四项通讯故障：单元主控板至测试装置的上行通讯中断和上行通讯错误，以及测试装置至单元主控板的下行通讯中断和下行通讯错误。

当功率单元在充电试验过程中出现上述故障时，应立即停止充电并通过辅助充电设备内置放电电阻快速给电容器放电，同时控制器报“充电异常”。如果充电过程正常，控制器报“充电正常”。

3.2 运行试验

在功率单元充电完成后，开始进行空载发波运行试验，控制器按照一定的工频、开关频率和调制度生成上、下管的脉冲信号，如图7所示。此时功率单元处于解锁状态，通过检测下一控制周期的模块输出电压来判断上、下管IGBT能否正常导通及关断。

如图8所示，当正弦调制信号 V_{cmd} 大于三角载波 U_z 时，功率单元上管IGBT导通，当正弦调制信号 V_{cmd} 小于三角载波 U_z 时，功率单元下管IGBT导通。

因为控制器采样数据是离散的，控制周期设定

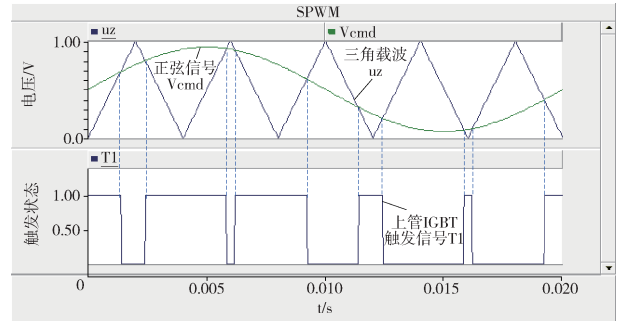


图8 SPWM 调制

Fig. 8 SPWM modulation

为 $100 \mu\text{s}$ ，当IGBT执行某动作时，对应的模块输出电压在下一个控制周期才会反馈给控制器。按照1.2小节描述的工作机制，在解锁状态下，当控制器下发上管IGBT开通信号时，在下一个控制周期检测出模块输出电压等于电容电压，上管IGBT开通正常，反之异常；当装置下发下管IGBT开通信号时，在下一个控制周期检测出模块输出电压为零，则说明下管IGBT开通正常，反之异常。当上、下管IGBT测试都通过后，控制器报“运行正常”、“系统正常”，反之报“运行异常”、“系统异常”。

3.3 放电试验

功率单元完成运行测试后，开始进行放电试验。功率单元放电有两种方式：通过功率单元电容器并联的放电电阻进行放电，称为慢放；通过辅助充电设备内置放电电阻进行放电，称为快放。

在放电测试过程中，单元主控板会实时上报模块电容电压，测试装置也会测量直流输出端口电压，并通过AD板卡上传给控制器，控制器通过采集到的电压值，根据公式(4)进行放电曲线RC时间常数计算，用于判断功率单元放电情况是否正常，RC时间常数异常时控制器报“放电异常”。

$$U_t = U_e \times \text{EXP}(-t/\tau) \quad (4)$$

式中： U_t 为任意时刻电容电压； U_e 为电容初始放电时刻电压。

在功率单元没有故障时，先采用慢放的方式进行放电。当电压跌落到设定的电压阈值、RC时间常数异常或放电过程中出现其他类型的故障时，功率单元电容放电直接由慢放切换到快放。功率单元放电测试具体流程如图9所示。

4 功率单元现场测试装置

在上述功率单元现场测试方法及流程的基础

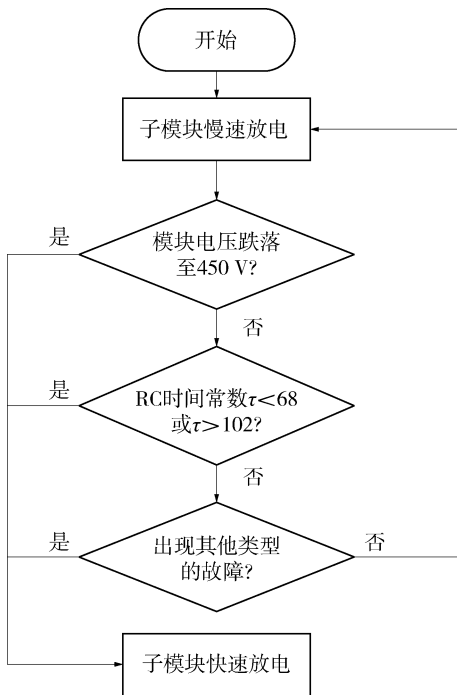


图 9 功率单元放电测试流程

Fig. 9 Evaluation of discharging performance of power module

上, 我们研制了一台功率单元现场测试装置, 测试装置设计原理框图如图 10 所示。

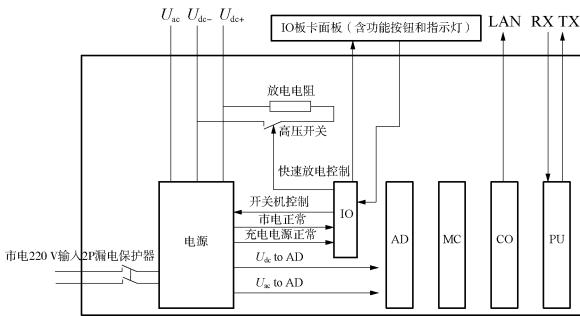


图 10 测试装置设计原理框图

Fig. 10 Design scheme of the test device

如图 10 所示, 功率单元主控板与测试装置采用光纤通讯, 功率单元会上报自身的运行状态和故障信息给测试装置, 测试装置再综合状态字、故障字及系统的运行状态, 制定对应的测试逻辑并下发相关命令。运行状态包含 IGBT 的解、闭锁状态, 旁路接触器返回的状态等, 故障信息包含功率单元的通讯故障、IGBT 驱动故障、取能故障、模块过压、模块欠压等。

测试装置基于实际单元主控板与阀控系统通讯协议为前提, 以控制器和各功能板卡为基础, 集成

了充电电源、放电回路、测试按钮、液晶显示等功能, 其面板布局如图 11 所示。

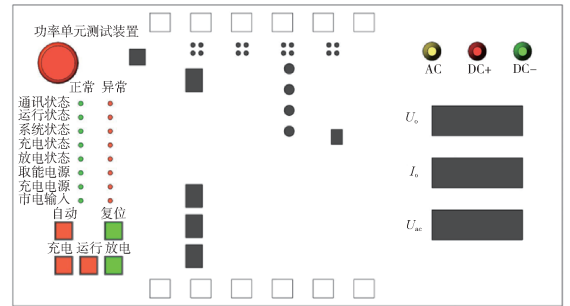


图 11 测试装置面板布局

Fig. 11 Panel layout of the test device

测试装置设计自动测试和分步测试两种操作模式, 自动测试模式下测试装置自动完成各项试验, 测试结果通过 IO 面板上对应指示灯显示。分步测试模式下, 装置面板上提供各项试验的使能按钮, 由操作人员手动选择需要进行的试验项目。使用自动测试, 可快速检测功率单元是否存在问题, 提高工作效率, 使用分步测试, 可对自动模式下已排查出的功率单元再进行详细测试, 以锁定问题来源, 便于检修。

本项目研制的功率单元模块测试装置已在南澳多端柔直工程塑城换流站进行应用。应用该装置可将单个功率单元模块测试时间由原来的 30 min 缩短为 10 min, 每年至少可缩短功率单元模块现场测试时间 49 h, 有效提高了功率单元模块现场测试效率。

5 结论

本文在分析功率单元工作原理以及厂内测试项目的基础, 设计了一种适用于现场的功率单元测试方法, 解决了目前功率单元测试内容完备性不足、测试效率低下的问题。在所述测试方法的基础上, 我们研制了一台功率单元测试装置, 可实现功率单元的自动测试和分布测试, 进一步提高了测试效率和准确性。目前研制的装置已经在南澳多端柔直输电工程塑城换流站试点应用。工程实践表明, 该测试装置所采用的测试方法贴近工程实际情况, 为功率单元的运检、验收提供了有效的测试手段, 所提出的方法也可为其他柔直工程的功率单元测试工作提供借鉴。

参考文献:

- [1] 钟杰峰, 陈丽萍, 袁康龙, 等. 多端柔性直流输电技术的现状及应用前景分析 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(增刊1): 38-45.
ZHONG J F, CHEN L P, YUAN K L, et al. Analysis on present situation and application prospect of VSC-MTDC technology [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(Supp. 1): 38-45.
- [2] 许树楷, 罗雨. 背靠背输电系统中柔性直流与常规直流的协调控制策略 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(2): 9-15.
XU S K, LUO Y. Study on coordination control strategy of VSC/LCC BtB HVDC [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2): 9-15.
- [3] 许映佳, 罗映红, 史彤彤, 等. 具有直流故障自清除能力的新型 MMC 子模块及其混合拓扑 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 129-137.
LIU Y J, LUO Y H, SHI T T, et al. A new MMC sub-module with DC fault self-clearing ability and its hybrid topology [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 129-137.
- [4] 李金科, 金新民, 吴学智, 等. 模块化多电平变流器模块电压纹波抑制策略及应用 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1892-1899.
LI J K, JIN X M, WU X Z, et al. Strategy and application of reducing capacitor voltage ripples in modular multilevel converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1892-1899.
- [5] 蒋霖, 周诗嘉, 李子寿, 等. 可仿真任意工况的 MMC 等值电磁暂态仿真模型与平均值模型 [J]. 南方电网技术, 2016, 10(2): 10-17.
JIANG L, ZHOU S J, LI Z S, et al. Equivalent electromagnetic model and averaged value model of MMC for operating condition simulation [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(2): 10-17.
- [6] 杨海倩, 王玮, 荆龙, 等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析 [J]. 电网技术, 2016, 40(1): 40-46.
YANG H Q, WANG W, JIN L, et al. Analysis on transient characteristic of DC transmission line fault in MMC based HVDC transmission system [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 40-46.
- [7] 杨超, 梁海平, 顾雪平, 等. 基于电压源换流器 HVDC 联网的受端电网扩展黑启动方案 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 207-215.
YANG C, LIANG H P, GU X P, et al. The recovery strategy of the extended black-start for the receiving end system based on the voltage source converter-HVDC [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 207-215.
- [8] 吴亚楠, 吕天光, 汤广福, 等. 模块化多电平 VSC-HVDC 换流阀的运行试验方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 8-15+4.
WU Y N, LV T G, TANG G F, et al. An operational test

method for VSC-HVDC valves based on modular multi-level converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30): 8-15+4.

- [9] 许彬, 王平, 李子欣, 等. 模块化多电平换流器阀段运行试验方法研究 [J]. 电工电能新技术, 2016, 35(7): 24-30.
XU B, WANG P, LI Z X, et al. Research on operational test method for modular multi-level converter valves [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(7): 24-30.
- [10] 欧阳有鹏, 谢晔源, 朱铭炼, 等. 换流阀子模块 IGBT 短路测试系统分析与设计 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 109-113.
OUYANG Y P, XIE Y Y, ZHU M L, et al. Analysis and design of IGBT short circuit test system for sub modular of converter valve [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 109-113.

作者简介:



CAI M

蔡明(通信作者)

1973-, 男, 广东潮州人, 高级工程师, 电气工程硕士, 主要从事电力系统运行及企业管理工作 (e-mail) 13802302981@139.com.

林寰

1989-, 男, 广东汕头人, 工程师, 电气工程硕士, 主要从事多端柔性直流输电运行维护工作 (e-mail) achilles_lin1031@hotmail.com.

廖其艳

1985-, 男, 安徽安庆人, 高级研发工程师, 电力电子与电力传动硕士, 主要从事柔性直流输电系统仿真建模与系统控制 (e-mail) qy_liao@163.com.

马广福

1972-, 男, 辽宁台安人, 高级调试工程师, 电气工程及其自动化学士, 从事柔直输电换流阀出厂测试试验 (e-mail) magf@rxhk.com.

陈冰

1977-, 男, 广东潮州人, 教授级高级工程师, 电气工程硕士, 长期从事高压交直流输电工程技术管理、项目管理, 近期从事柔性直流和大容量储能技术研究工作 (e-mail) chenbing@gedi.com.cn.

(责任编辑 李辉)