

换流阀子模块 IGBT 短路测试系统分析与设计

欧阳有鹏, 谢晔源, 朱铭炼, 姜田贵, 付俊波

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 是换流阀子模块的核心器件, 研究其抗短路能力对于提高换流阀可靠性具有重要意义。根据模块化多电平换流阀的运行机理, 设计了一种换流阀子模块 IGBT 短路试验回路及系统, 进行了换流阀在稳态运行下 IGBT 短路故障试验, 从而实现了对 IGBT 的稳态应力和短路故障下的暂态应力综合考核。最后通过试验平台进行验证, 结果表明所提试验回路和系统的正确性。

关键词: 统一潮流控制器; 模块化多电平换流器; 绝缘栅双极型晶体管; 短路试验

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)04-0109-05

0 引言

统一潮流控制器 (unified power flow controller, UPFC) 作为目前功能最全面的柔性交流输电系统 (FACTS) 设备, 在潮流控制上具有较大的优势。既可以快速控制输电线路有功和无功潮流, 提高线路输电能力, 也可以提高系统电压稳定性, 改善系统阻尼, 提高功角稳定性^[1-2]。目前, 国内外首套基于模块化多电平换流器 (modular multilevel converter, MMC) 技术的 UPFC 工程已经在南京西环网 220 kV UPFC 实现示范应用, 为南京电网供电能力提升发挥了重要作用。为了提高苏州南部 500 kV 电网供电能力、特高压直流功率消纳等问题, 第一个 500 kV 的苏南 UPFC 工程也在 2017 年 12 月 19 日成功投运^[3-5]。

换流器作为 UPFC 的核心设备, 运行工况非常复杂, 其可靠性也成为影响整个系统安全的关键因素之一。作为换流器中的核心器件, 绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 的失效尤其是短路失效对换流器造成的损坏是毁灭性的、不可逆的。因此, 研究其抗短路能力对于提高换流器的可靠性具有重要意义^[6-10]。

本文根据模块化多电平换流器的运行机理, 对换流阀的运行特性、稳态应力和暂态应力进行分析^[11-14], 提出一种换流阀子模块 IGBT 短路试验回路及系统, 进行子模块在稳态运行下 IGBT 短路故障试验, 从而实现了对 IGBT 稳态应力和短路故障下暂态应力的综合考核, 并通过试验平台进行了验证。

1 MMC 基本原理

1.1 苏南 500 kV UPFC 工程概述

苏南 500 kV UPFC 主回路拓扑结构如图 1 所

示。串、并联侧 3 个换流器采用背靠背连接方式。并联侧换流器 1 套, 通过启动电阻接至并联变压器, 再接入木渎 500 kV 母线; 串联侧换流器 2 套, 通过 2 个串联变压器接入木渎—梅里 500 kV 双回线路。

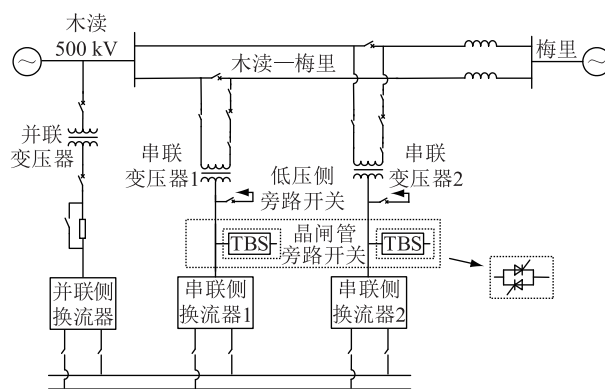


图 1 苏南 500 kV UPFC 主回路拓扑示意

Fig.1 Sunan 500 kV UPFC main circuit topology diagram

1.2 MMC 基本结构

图 2(a) 为苏南 500 kV 的 UPFC 换流器的主电路拓扑结构示意图, 换流器包含 6 个桥臂, 每个桥臂由 123 个半桥型子模块 (sub-module, SM) 及一个桥臂电抗器串联组成。子模块的拓扑结构如图 2(b) 所示, 由 2 个 IGBT 器件上管 T1 和下管 T2、2 个反向并联二极管 D1 和 D2、子模块电容 C、保护晶闸管 SCR、旁路开关 K 以及均压电阻 R 组成^[15-18]。

2 子模块短路及耐受性能指标

2.1 子模块 IGBT 短路故障

换流阀子模块在正常工作时, 按照控制系统生成的触发脉冲, 子模块中的 T1 和 T2 交替导通。但是, 如果 T1 和 T2 触发脉冲出现误触发、死区设置出现问题或者其他金属线短路发生, 此时直流侧电容 C 将通过 T1、T2 直接放电, 如图 3(a) 所示; 如果

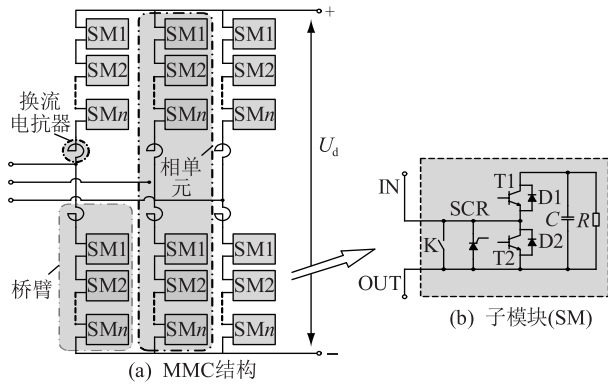


图2 MMC基本结构

Fig.2 Basic structure of MMC

其他原因造成子模块发生金属线短路,随着 IGBT 器件的开通与关断,直流侧电容将通过 T1 或者 T2 直接放电,如图 3(b)、(c)所示。

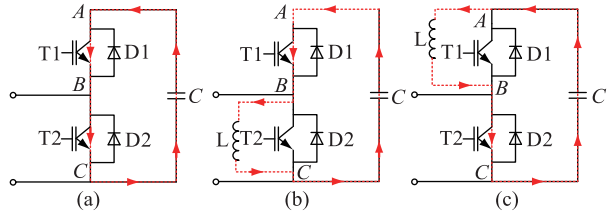


图3 IGBT 短路故障模式

Fig.3 Short circuit fault model of IGBT

放电回路中的电阻有 IGBT 阻抗、电容器内阻和导线电阻构成。由于放电回路中的电阻非常小。放电电流可能会非常大(峰值可达几千安至十几千安),并且因为回路电感在几百纳亨至几千纳亨左右,电流上升速度也非常快,一般会在数个微秒内达到峰值,然后开始逐渐衰减。因此在短路发生时刻,此故障只能由 IGBT 的门极驱动保护电路关断。

2.2 IGBT 短路耐受性能指标

IGBT 的抗短路能力,是 IGBT 可以承受复杂工况下的短路故障而不至于损坏的能力。IGBT 的短路耐受性能指标包括以下几点。

(1) 短路时间。IGBT 在短路时将承受近千倍于正常时的功率冲击,从考虑短路检测的动作响应时间及驱动动作时间考虑,IGBT 应能承受 10 μs 短路冲击而不损坏。

(2) 短路安全工作区 (short circuit SOA, SC-SOA)。IGBT 器件的安全工作区域 (safe operation area, SOA) 限定了各种临界的不至于导致器件损坏的运行状态。SCSOA 限定了非重复性的单次关断 (如短路电流关断) 的安全工作区域。IGBT 发生短路故障时,IGBT 的关断电压尖峰,短路电流峰值均不能超过此区域。

(3) 结温。短路发生后,该短路电流产生的损耗积累为热量使 IGBT 内部硅片温度急剧上升。IGBT 技术手册中给出的暂态热阻抗表示为:

$$Z_{th(j-c)}(t) = \sum_{i=1}^n R_i(1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (1)$$

IGBT 的结温模型如图 4 所示。

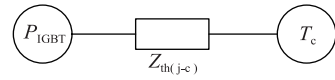


图4 IGBT 结温模型

Fig.4 Thermal model of IGBT junction temperature

图中, P_{IGBT} 为 IGBT 的损耗; $Z_{th(j-c)}$ 为 IGBT 暂态热阻抗(内部芯片到基板); T_c 为 IGBT 稳态运行下的外壳温度。

IGBT 的结温计算方法如下:

$$T_{j_IGBT}(t) = P_{IGBT} Z_{th(j-c)}(t) + T_c \quad (2)$$

其中: T_{j_IGBT} 为 IGBT 的结温。半导体的本征温度极限为 250 °C,当结温超过本征温度,器件将丧失阻断能力,由于短路电流使结温升高,一旦超过其热极限时,栅极保护也相应失效。

3 IGBT 短路试验回路及控制系统

3.1 IGBT 短路测试现状

目前,IGBT 短路测试的主要方法是基于通用的双脉冲测试法^[19],试验回路包括直流电源、测试子模块以及短铜排,如图 5 所示。直流电源用于给子模块充电,短铜排将测试子模块的 T2 管短接,模拟下管短路,然后给 T1 管触发开通,验证其抗短路能力。此方法的主要问题在于不能模拟子模块在实际工况下的短路故障,不能正确反映换流阀子模块 IGBT 的电压、电流以及温度应力。

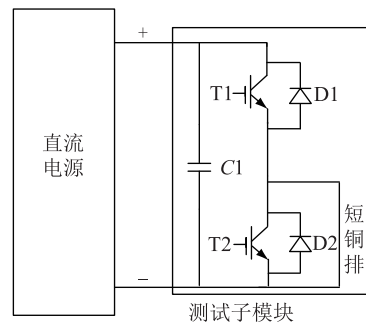


图5 IGBT 双脉冲测试

Fig.5 IGBT double-pulse test

3.2 IGBT 短路试验系统

本文模块短路试验系统如图 6 所示。试验回路包括直流电源、测试子模块、陪试子模块和负载电抗器 L 、水冷系统、控制保护系统及测量系统。

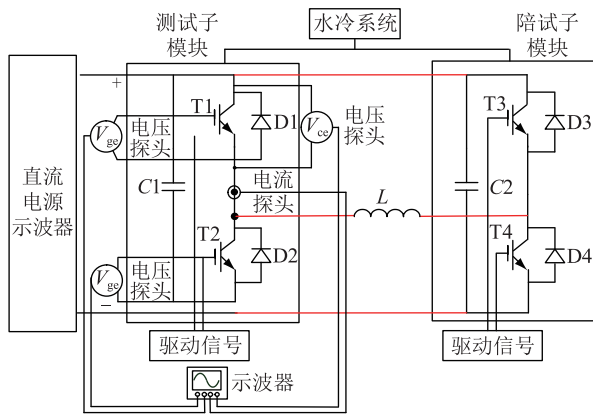


图 6 子模块短路试验系统

Fig.6 Short circuit testing system of Sub-module

3.3 IGBT 短路试验控制系统

MMC 子模块短路试验控制包括稳态控制与暂态控制两个方面。

3.3.1 稳态控制

稳态运行时采用定电流控制。通过该策略,使得负载电抗器 L 的运行电流 I_L 控制到目标值 I_{set} 。 I_L 控制策略如图 7 所示。

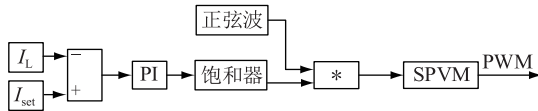


图 7 定电流控制原理

Fig.7 Constant current control strategy

3.3.2 暂态控制

当 I_L 达到目标值 I_{set} 后,抗短路试验系统稳态运行,即在 t_1 到 t_2 时刻,被测子模块按照控制系统生成的触发脉冲, T1 和 T2 交替导通;在 t_2 时刻,通过控制系统在 T1 导通区间强制触发 T2 导通,造成 T1、T2 直通短路故障。逻辑如图 8 所示。

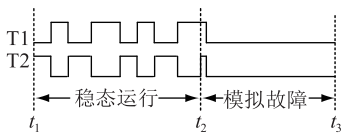


图 8 IGBT 短路故障控制策略

Fig.8 IGBT short circuit fault control strategy

4 试验验证与抗短路能力评估

4.1 试验验证

为了验证本文所设计的 IGBT 短路测试系统,搭建了 MMC 子模块短路试验测试平台,试验系统额定直流电压 2500 V,负载电流有效值 2050 A,额定频率 50 Hz。

稳态控制下被测子模块 T2 管的 V_{ce} 电压和负载

电流 I_L 波形如图 9 所示。被测子模块的电压和电流近似模拟 MMC 子模块实际运行中电压、电流和温度应力。

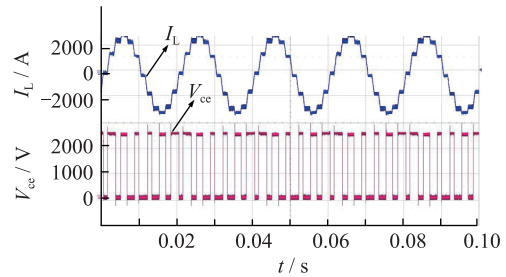


图 9 稳态控制试验波形

Fig.9 Test waveform of steady state control

待 MMC 阀在稳态运行 2 h,进行暂态控制,试验波形如图 10 所示。可以看出,短路故障下通过 T2 的电流瞬间上升至 11.7 kA,然后在 10 μ s 左右关断。

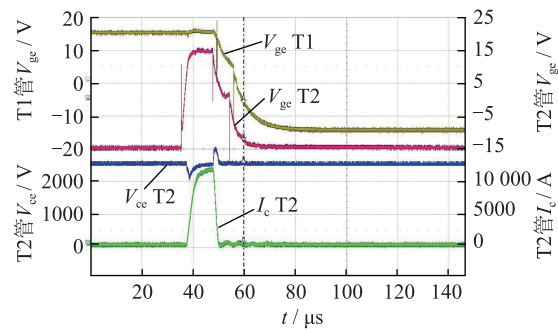


图 10 暂态控制试验波形

Fig.10 Test waveform of transient state control

4.2 抗短路能力评估

4.2.1 短路时间

由图 10 所知, T2 约在 12 μ s 内关断,满足 IGBT 应承受 10 μ s 短路冲击而不损坏的要求。

4.2.2 短路安全工作区 SCSOA

根据图 10 所示的 T2 管承受的电压以及电流应力,其绘制的 SCSOA 曲线如图 11 所示。

查找 IGBT 技术手册,其短路条件下关断电压尖峰 $V_{CEM\ CHP} \leq 4500$ V,短路电流 $I_{SC} = 11\ 800$ A。本次试验中, T2 管的 $V_{CEM\ CHP} = 2940$ V, $I_{SC} = 11\ 700$ A,满足其 SCSOA 的要求。

4.2.3 结温仿真

采用局部网络热路模型,依据本文式(2)的结温方法,搭建 IGBT 结温仿真模型,结合 IGBT 短路测试系统的试验数据,验证 IGBT 承受短路电流时的结温是否安全,仿真模型如图 12 所示。

针对暂态温升,此型号 IGBT 技术手册中给出了器件暂态温升曲线 $Z_{th(j-c)IGBT}$,如表 1 所示。

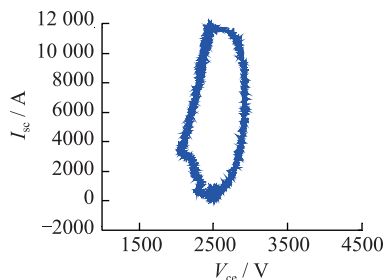


图 11 SCSOA 曲线
Fig.11 SCSOA curve

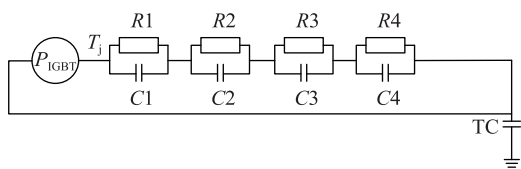


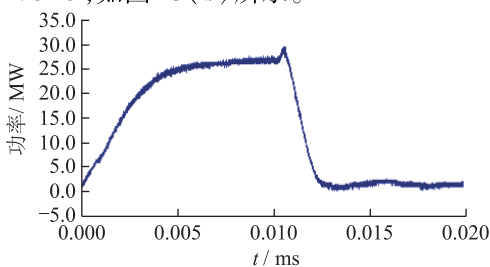
图 12 IGBT 结温计算和仿真模型
Fig.12 Thermal model of IGBT junction temperature for calculation and simulation

表 1 暂态热阻曲线

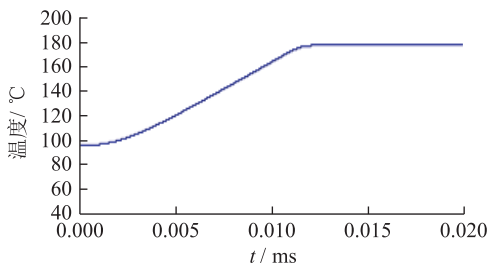
Tab.1 Thermal impedance curve

i	1	2	3	4
R_i	1.200	1.490	0.269	0.246
τ_i	0.581	0.059	0.006	0.001

根据试验采集的 IGBT 的 V_{ce} 电压和短路电流 I_{sc} 数据,结合局部网络热路模型,搭建了结温仿真模型。仿真结果表明:短路故障发生后,IGBT 承受的瞬时功率急剧上升,10 μs 左右上升至峰值 30 MW,如图 13(a)所示。设 IGBT 基板初始温度为 80 $^{\circ}C$,短路故障下,IGBT 结温急剧上升,10 μs 左右上升至峰值 176 $^{\circ}C$,如图 13(b)所示。



(a) IGBT瞬时功率曲线



(b) IGBT结温仿真曲线

图 13 IGBT 结温仿真结果

Fig.13 Simulation result of IGBT junction temperature

虽然此时 IGBT 的结温已经超过其正常运行下最高允许结温 159 $^{\circ}C$,但是远低于半导体的本征温度极限为 250 $^{\circ}C$,安全且有裕量。

5 结语

针对换流阀的运行特性,为了快速有效地验证 MMC 阀子模块 IGBT 抗短路能力,搭建了 MMC 子模块短路试验测试平台,近似地模拟 MMC 子模块在实际运行工况中短路故障下的暂态应力,特别适用于子模块在样机研制阶段的型式试验验证。结果表明,所提出的 IGBT 短路试验系统和性能指标评估方法准确有效,为 UPFC 工程换流阀的研制提供了保障依据。

参考文献:

[1] 朱鹏程,刘黎明,刘小元,等. 统一潮流控制器的分析与控制策略[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):45-51.
ZHU Pengcheng, LIU Liming, LIU Xiaoyuan, et al. Analysis and study on control strategy for UPFC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(1):45-51.

[2] 王莹,甄宏宁,常宝立,等. UPFC 在南京西环网中的应用需求分析[J]. 江苏电机工程,2016,35(1):53-56.
WANG Ying, ZHEN Hongning, CHANG Baoli, et al. Research on the application of UPFC in Nanjing Western Grid [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016,35(1):53-56.

[3] 凌峰,秦健,戴阳,等. 南京 UPFC 工程运行方式[J]. 江苏电机工程,2015,34(6):36-40.
LING Feng, QIN Jian, DAI Yang, et al. The operation modes for Nanjing UPFC Project [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015,34(6):36-40.

[4] 李鹏,林金娇,孔祥平,等. 统一潮流控制器在苏南 500kV 电网中的应用[J]. 电力工程技术,2017,36(1):20-24.
LI Peng, LIN Jinjiao, KONG Xiangping, et al. Application of UPFC in the 500 kV Southern Power Grid of Suzhou[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(1):20-24.

[5] 张军,吴金龙,梁云丹,等. 南京 UPFC 工程控制保护系统架构与配置研究[J]. 江苏电机工程,2015,34(6):1-4.
ZHANG Jun, WU Jinlong, LIANG Yundan, et al. Study on architecture and configuration for control and protection system of Nanjing UPFC Project [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015,34(6):1-4.

[6] DORN J, HUANG H, RETZMANN D. A new multilevel voltage-sourced converter topology for HVDC applications[C]// CIGRE Session. Paris, France; International Council on Large Electric Systems, 2008:1-8.

[7] ROHNER S, BERNET S, HILLER M, et al. Modulation, losses, and semiconductor requirements of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8):2633-2642.

[8] DORN J, RETZMANN D, SOERANGR D. Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission[C]// IEEE/PES

- Transmission and Distribution Conference and Exposition. Milpitas, USA; IEEE, 2008; 1-16.
- [9] 汤广福, 贺之渊, 庞辉, 等. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui, et al. Research, application and development of VSC HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [10] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010. 72-76.
TANG Guangfu. High voltage direct current transmission technology based on voltage source converter[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 72-76.
- [11] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 7-9.
XU Zheng. Flexible HVDC transmission system[M]. Beijing, China: Machinery Industry Press, 2012: 7-9.
- [12] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电——一种新一代的 HVDC 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.
WEN Jun, ZHANG Yigong, HAN Minxiao, et al. HVDC based on voltage source converter a new generation of HVDC technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 47-51.
- [13] 马为民, 吴方劫, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.
MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [14] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multi-level converter topology suitable for a wide power range[C]// IEEE Power Technology Conference. Bologna; IEEE, 2003: 23-26.
- [15] 罗湘, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 合成试验方法在 VSC-HVDC 换流阀短路电流试验中的应用[J]. 电网技术, 2010, 36(7): 9-13.
LUO Xiang, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Application of synthetic test method in short-circuit[J]. Power System Technology, 2010, 36(7): 9-13.
- [16] 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, 36(5): 25-29.
LUO Xiang, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Test methods of converter valves in VSC-HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2010, 36(5): 25-29.
- [17] 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 Yanan, LYU Tianguang, TANG Guangfu, 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.
- [18] 汤广福, 温家良, 贺之渊, 等. 大功率电力电子大功率电力电子装置等效试验方法及其在电力系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(36): 1-9.
TANG Guangfu, WEN Jialiang, HE Zhiyuan, et al. Equivalent testing approach and its application in power system for high power electronics equipments[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(36): 1-9.
- [19] 刘国友, 覃荣震, 黄建伟, 等. 牵引级高压 IGBT 模组短路特性研究及其优化[J]. 机车电传动, 2014, 1(31): 7-10.
LIU Guoyou, QIN Rongzhen, HUANG Jianwei, et al. Research and optimization of high-voltage IGBT module short circuit characteristic for traction application[J]. Electric Drive for Locomotives, 2014, 1(31): 7-10.

作者简介:



欧阳有鹏

欧阳有鹏(1985—), 男, 硕士, 工程师, 从事柔性直流输电和无功补偿技术研究工作(E-mail: ouyangyp@nrec.com);

谢晔源(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事柔性直流输电、柔性交流输电和无功补偿技术研究工作;

朱铭炼(1985—), 男, 硕士, 工程师, 从事柔性直流输电技术研究工作。

Analysis and Design of IGBT Short Circuit Test System for Sub Modular of Converter Valve

OUYANG Youpeng, XIE Yeyuan, ZHU Minglian, JIANG Tianguai, FU Junbo

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: As the key device of sub module of converter valve, IGBT is of great practical significance to improve the reliability of the converter valve by studding the anti-short circuit ability of IGBT. Based on the operating mechanism of modular multilevel converter valve, this paper proposes an IGBT short circuit test circuit and system of sub module of converter valve. A comprehensive assessment of the transient stress by short fault and the steady stress of the converter valve is achieved. The validity of test circuit and system is verified by proposing a test platform.

Key words: UPFC; modular multilevel converter; IGBT; short-circuit test

(编辑 陈娜)