

# 柔直换流阀子模块控制器 EMC 能力提升研究

闻福岳<sup>1,2</sup>, 卢昭禹<sup>1,2\*</sup>, 曹均正<sup>1,2</sup>, 朱欢<sup>1,2</sup>, 韩磊<sup>1,2</sup>, 杜宇鹏<sup>1,2</sup>

(1. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京市 昌平区 102200;

2. 北京市直流输配电工程技术研究中心, 北京市 昌平区 102200)

## Improvement of EMC Capability of the Submodule's Controller in the VSC-HVDC Converter

WEN Fuyue<sup>1,2</sup>, LU Zhaoyu<sup>1,2\*</sup>, CAO Junzheng<sup>1,2</sup>, ZHU Huan<sup>1,2</sup>, HAN Lei<sup>1,2</sup>, DU Yupeng<sup>1,2</sup>

(1. C-EPRI Electric Power Engineering Co., Ltd., Changping District, Beijing 102200, China;

2. Beijing DC T&D Engineering Technology Research Center, Changping District, Beijing 102200, China)

**Abstract:** IGBT is the core device of the VSC-HVDC converter, and it provides a high switching speed. There are extremely strong electromagnetic disturbances in the continuous switch of the IGBT. In addition, valve halls become environments with unconventional strong electromagnetic disturbance because of other transient disturbances such as lightning strokes. The controller of a submodule is a low-voltage equipment that receives the command code from a valve-based controller and controls and protects the submodule. Therefore, the electromagnetic compatibility (EMC) of the controller is extremely important. In this work, the electromagnetic environment around a submodule is simulated and analyzed to improve the EMC capability of the controller of the submodule. The parameters of EMC tests are formulated according to the analysis results and the relevant national and military standards. The hardware circuit and test methods are optimized to verify and improve the electromagnetic immunity ability of the controller of the submodule. The hardware circuit and test methods successfully passed the surge immunity test and conducted disturbance immunity test induced by an RF field and have been further verified in recent projects.

**Keywords:** VSC-HVDC; submodule; electromagnetic compatibility

**摘要:** 柔性直流输电换流阀所用的核心器件绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的开关速度很快, IGBT开关过程中会产生强烈的电磁骚扰, 加上雷击等瞬态骚扰, 导致阀厅形成非常规的强电磁骚扰环境。子模块控制器作为子模块的控制和保护

单元, 属于低压信号设备, 位于高压端子模块本体上, 负责接收阀基控制器的开关指令和子模块本体的控制保护, 因此电磁兼容(EMC)性能面临着严峻考验。为提升换流阀子模块控制器的EMC能力, 对换流阀子模块周围电磁环境进行了仿真分析, 并根据分析结果和相关标准, 设定了控制器相关EMC试验参数, 对控制器进行了针对性的电磁骚扰试验考核。系统分析并优化电路和试验方法, 顺利通过浪涌抗扰度试验和射频场感应的传导骚扰抗扰度试验, 并在实际工程应用中得到了验证。

**关键词:** 柔性直流输电; 子模块; 电磁兼容

## 0 引言

近年来, 随着柔性直流输电技术的迅速发展, 柔直换流阀在电力系统中的应用越来越多。高压电力系统本身是一个复杂的电磁骚扰源, 高电压、大电流的设备(如变压器等)在正常运行时会产生很强的电磁骚扰<sup>[1-3]</sup>。换流站开关刀闸的操作在二次通道形成的骚扰主要包含浪涌和快速瞬变脉冲等形式<sup>[4-6]</sup>。柔直换流站的交流系统会在空间产生低频电磁场, 主要包含工频成分<sup>[7]</sup>; 柔直换流阀通过对子模块的不断投切实现电平调制, 功率器件不断开通和关断大电流, 换流阀中电压和电流的急剧变化会产生频谱较宽的电磁骚扰<sup>[8]</sup>。系统短路、遭受雷击等极端瞬态也会给换流站带来能量极大的电磁骚扰, 类似于浪涌(冲击)信号<sup>[9]</sup>。因此, 在柔直换流站设备运行产生的电磁骚扰和外部环境对电网冲击的共同作用下, 阀厅的电磁环境比普通变电站更加严酷。

柔直换流站智能化水平很高, 换流阀中的就地二

基金项目: 国家电网公司科技项目(高压大容量柔性直流工程换流阀标准化设计与可靠性提升技术研究)。

Science and Technology Foundation of SGCC (Research and improvement on standardization and reliability of high voltage and high capacity VSC-HVDC converter valve).

次设备使用了高速低电压器件, 这些器件对电磁骚扰尤其是高频和瞬态骚扰的敏感度较高<sup>[10-13]</sup>。在极端情况下, 电磁骚扰会使二次设备发生误动作, 导致换流阀运行在危险工作状态, 可能引起系统跳闸, 损坏电力设备, 造成巨额经济损失。

在早期建设的柔性直流输电示范工程中, 子模块控制器的EMC能力不足曾导致子模块故障, 最严重的造成换流站系统停运。因此, 为提高柔直工程运行可靠性, 必须提升子模块控制器的EMC能力。

子模块控制器由阀上就地二次控制保护板卡组成, 安装在阀厅高电压、大电流设备的框架上。为了提高子模块控制器的EMC能力, 本文在对换流阀控制器电磁环境仿真和理论分析的基础上, 依据相关标准, 开展子模块控制器EMC能力试验检测与提升工作, 通过改进板卡电路设计和抗扰度防护措施, 提升子模块控制器的EMC能力, 并在实际工程中验证。

## 1 阀厅电磁环境与抗扰度分析

子模块控制器周边的电磁骚扰来源主要有雷击等瞬态干扰和换流阀子模块投切操作2个方面。文献[15]提出, 当换流站遭遇雷击等瞬态干扰时, 雷电的直接效应、间接效应能够通过多种途径耦合到敏感的二次设备<sup>[15-16]</sup>, 柔直换流阀处在金属墙体全封闭的阀厅之中, 雷电产生的辐射干扰很难直接影响控制器工作, 但是通过交流和直流主线路可以耦合到子模块控制器, 类似于浪涌干扰。

文献[17]实测了柔直换流阀系统的辐射电磁骚扰, 随着功率器件动作频率的上升, 电磁辐射骚扰迅速衰减, 高辐射值场强出现在中低频段特别是小于1 MHz的频段<sup>[17-18]</sup>, 该频段是换流阀IGBT开关速率段, 多在 $\mu\text{s}$ 级, 叠加到设备上的干扰形式类似于射频辐射和射频传导干扰。

换流阀子模块的投切通过IGBT的开通和关断实现, 使用时域有限差分计算软件, 对4500 V/3000 A IGBT开关过程的电磁场强度进行仿真分析, 仿真条件为子模块运行电压2500 V、频率500 Hz, IGBT开关动作产生的强瞬态场强分布如图1所示, 统计表明, 场强高于10 V/m的时间约占20%。

子模块控制器是换流阀模块的核心控制和保护单元, 包含了微处理器、逻辑门等低压高频操作元器件, 属于柔直换流阀阀厅的二次控制设备, 实现了子模块IGBT等一次器件的控制、电容等一次器件的保

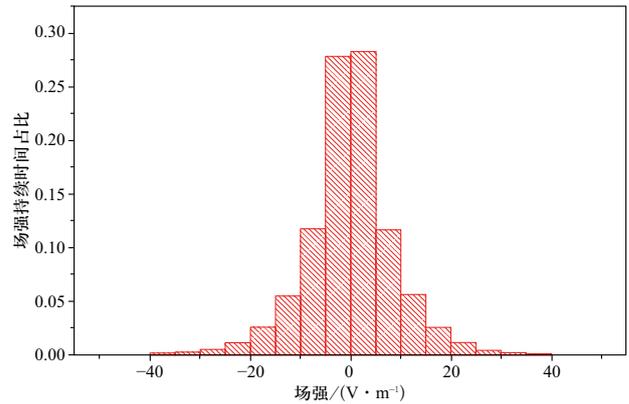


图1 4500 V/3000 A IGBT开关时场强分布

Fig. 1 Histogram of electric field distribution at 4500 V/3000 A IGBT's switching

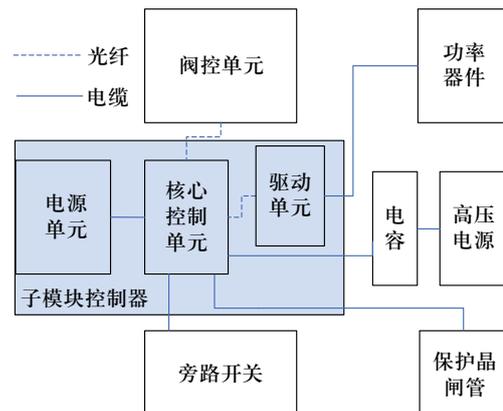


图2 子模块控制器接口示意图

Fig. 2 Scheme of sub-module controller's interface

护和通信等功能, 其主要接口如图2所示。

由图2可知, 子模块控制器包括电源单元、核心控制单元、功率器件驱动单元, 与阀控单元的接口为光纤, 与IGBT、电容、旁路开关、保护晶闸管的接口为电信号。核心控制单元中包含小信号的控制保护判断逻辑电路, 这些电路是工作电压等级低、最容易被干扰的部分。子模块控制器与换流阀一次线路直接相连的接口为电容接口, 因此电容端口会被浪涌干扰; 子模块处在电磁辐射环境中, 因此还需要对子模块进行射频辐射抗扰度和射频场感应传导抗扰度的性能测试。

子模块控制器受到的干扰主要有浪涌和辐射干扰2类, 子模块控制器由完全封闭的金属外壳进行屏蔽保护, 辐射干扰很难直接影响到板上的元器件, 但是控制器与一次设备连接线较长, 辐射通过连接线感应出的传导干扰信号可能会影响控制器的运行, 因此重点考核控制器的浪涌和传导抗扰度能力。本文分析试

验方法和电路原理,通过改进试验设备布局和电路设计方案,子模块控制器能够通过文中设置的抗扰度试验,控制器的参数如表1所示。

表1 子模块控制器参数

Table 1 Main parameters of submodule controller

参数	数值
额定工作电压/V	2200
过压保护值/V	4100
通信速率(光信号)/MHz	10
损耗(最大值)/W	15

## 2 抗扰度性能验证与提升

### 2.1 浪涌(冲击)抗扰度

依据GB/T 17626.5浪涌(冲击)抗扰度标准,浪涌来源于电力系统开关瞬态和雷电瞬态。阀厅外主接线遭遇雷击时产生的浪涌干扰会通过连接线直接传导到换流阀,这些瞬态干扰会直接耦合到电源网络<sup>[19]</sup>。标准规定电源线和短距离信号互连线的端口都要进行浪涌试验,浪涌试验等级如表2所示。为充分验证和提升控制器的抗浪涌能力,本文设定的试验等级为IV级。

表2 浪涌试验等级

Table 2 Level of surge immunity test

等级	开路试验电压(±10%)/kV
I	0.5
II	1.0
III	2.0
IV	4.0

#### 2.1.1 试验方法

子模块控制器的供电电源为电容,控制器的核心控制单元采集电容电压,实现子模块电容的过压、欠压保护,因子模块控制器无接地线,不需要对信号线进行浪涌试验。

试验使用耦合器把浪涌骚扰直接耦合到电源输入,试验接线如图3所示。图中辅助设备1为电容,延长连接线,通过测试信号源叠加干扰后再连接到控制器,受试设备(equipment under test, EUT)为子模块控制器,辅助设备2包括了IGBT、保护晶闸管、旁路

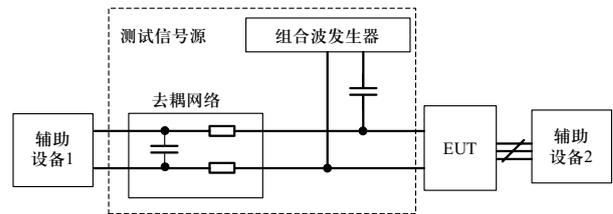


图3 浪涌(冲击)抗扰度试验接线示意图

Fig. 3 Wiring scheme of surge immunity test

开关和上位机,上位机代替阀控单元,实现单个子模块的控制和监视功能。

通过示波器测试得到0.5 kV浪涌的原始波形如图4所示,浪涌干扰峰值约为516 V。

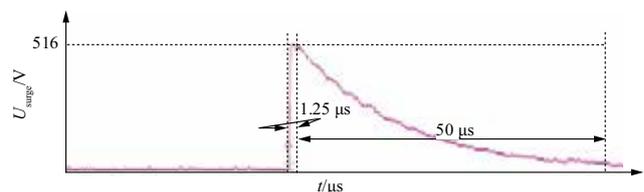


图4 0.5 kV浪涌干扰波形

Fig. 4 Waveform of 0.5 kV surge

由试验规范可知,浪涌发生波形为1.2 μs上升、50 μs下降的电压波,本试验中IV级设定峰值电压为差模4 kV,浪涌发生器开路输出电压峰值按0.5 kV→1 kV→2 kV→4 kV依次递增,每个电压重复10次,施加间隔与干扰发生设备充电时间有关。子模块控制器使用了浪涌吸收元件,其在低电压浪涌时不会动作,高等级的浪涌试验必须涵盖全部低等级试验,以检验浪涌吸收元件不动作的情况下设备是否可以正常工作。试验实际接线如图5所示。

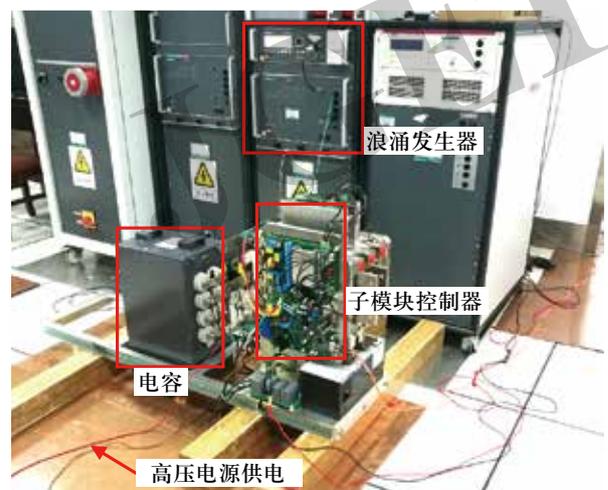


图5 浪涌试验布置

Fig. 5 Experimental setup of surge immunity test

2.1.2 缺陷与改进

试验改进前，子模块控制器可以通过0.5 kV、1 kV、2 kV等级的浪涌试验，无法通过4 kV浪涌试验，故障波形如图6所示。图中从 $T_1$ 时刻开始施加浪涌干扰； $T_1$ 至 $T_2$ 时段，因为波形采样设备被浪涌干扰，过压故障信号采集到的是干扰信号，不是真实过压故障信号。子模块控制器实际检测到的电容电压为

$$U_{\text{detect}} = U_c + U_{\text{surge}} \quad (1)$$

式中： $U_{\text{detect}}$ 为子模块控制器检测到的电压； $U_c$ 为电容实际运行电压； $U_{\text{surge}}$ 为浪涌干扰电压。此时检测到的叠加电压尖峰达到6200 V。改进前，经过的延时 $t_d$ 为

$$t_d = T_2 - T_1 \quad (2)$$

过压故障信号在 $T_2$ 时刻产生， $T_3$ 时刻消失， $t_d$ 实际测试值与缓冲器设计延时相符，约为30  $\mu\text{s}$ 。到 $T_3$ 时刻，过压信号消失， $T_1$ 到 $T_3$ 约33  $\mu\text{s}$ ，电路中设置的过压故障信号的脉宽为100  $\mu\text{s}$ ，到 $T_4$ 时刻结束。

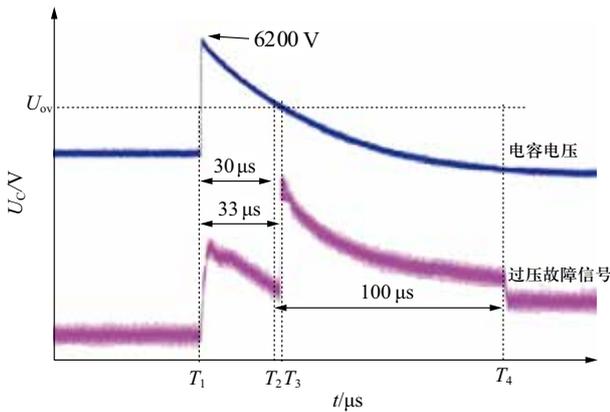


图6 受4 kV浪涌干扰后子模块电压与故障信号波形  
Fig. 6 Voltage and fault signal waveforms of submodule after being interfered by 4 kV surge

经过排查，出现故障的原因为板卡受到浪涌干扰后电容过压保护误动作。过压保护电路如图7所示。

图7中， $C_1$ 为子模块控制器供电电容； $R_1$ 、 $R_2$ 为采样分压电阻； $U_c$ 为供电电压； $V_{\text{ref}}$ 为参考比较电压。采样电路中，高压经过分压电阻后变成较低电压，与参

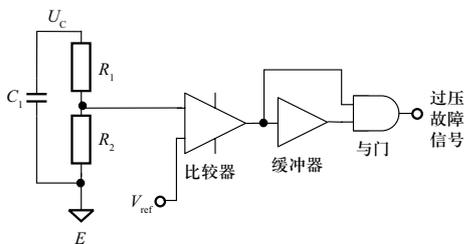


图7 过压比较电路

Fig. 7 Scheme of overvoltage comparison circuit

考比较电压比较后经过缓冲器。为了滤除干扰信号，缓冲器延时 $t_d$ 后产生另一路比较输出信号，与原信号相与后输出过压故障信号，信号时序如图8所示。

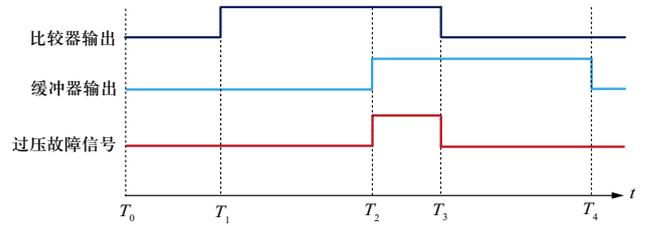


图8 过压故障信号输出时序

Fig. 8 Output sequence diagram of overvoltage fault signal

图8中， $T_0 \sim T_1$ 时段采样电压正常； $T_1$ 时刻采样电压大于过压阈值，比较器输出由低电平翻转至高电平，因缓冲器设定了延时输出，到 $T_2$ 时刻缓冲器输出才发生翻转，同时与门输出发生翻转，判定过压故障发生； $T_3$ 时刻，采样电压小于过压阈值，比较器输出由高电平翻转至低电平，同时与门输出发生翻转，判定过压故障消失；缓冲器延时可以有效防止因毛刺干扰触发过压故障，提高检测的抗干扰能力；设定合理的延时时间 $t_d$ ，需要综合考虑动作的及时性和浪涌的抗干扰性能。

为增强抗浪涌能力，重新选择缓冲器型号，增加缓冲器输出延时时间到50  $\mu\text{s}$ ，施加4 kV浪涌干扰后，过压故障信号未发生翻转，试验测试波形如图9所示，过压故障信号未输出100  $\mu\text{s}$ 高电平。

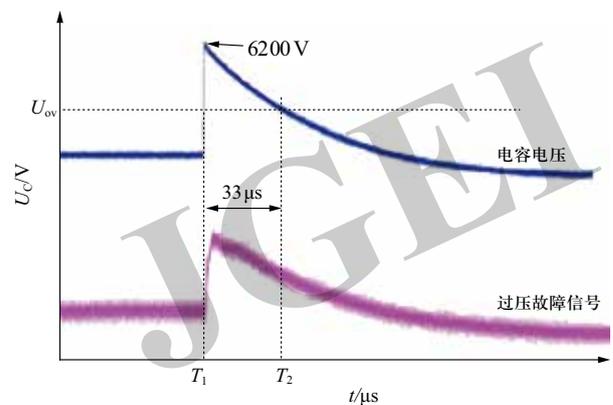


图9 整改后子模块电压与故障信号波形

Fig. 9 Voltage and fault signal waveforms of submodule after rectification

2.2 射频场感应的传导骚扰抗扰度

依据GB/T 17626.3 1.1 射频电磁场辐射抗扰度试验标准<sup>[20]</sup>，选用试验设备最高输出等级50 V/m，扫

频范围80 MHz~3 GHz, 对控制器进行试验, 试验通过, 控制器未出现异常。

依据GB/T 17626.6 1.1 射频场感应的传导骚扰抗扰度标准, 试验中的骚扰源来源于射频电磁场, 该电磁场作用于电缆, 虽然被骚扰设备的尺寸比骚扰频率的波长小, 但输入输出线路的长度可能与干扰频率的几个波长相近, 这些导线就可以接受外界电磁场的感应, 通过传导方式耦合外界干扰到设备内部, 对控制器产生干扰。这些骚扰场是由试验装置所产生的电压和电流所形成的近区电场和磁场来表示的, 用耦合和去耦装置提供骚扰信号给某一电缆, 同时保持其它电缆不受影响, 只近似于骚扰源以不同的幅度和相位范围同时作用于全部电缆的实际情况<sup>[21]</sup>。试验等级如表3所示。

表3 射频传导抗扰度试验等级 (150 kHz ~ 80 MHz)

Table 3 Level of RF conducted disturbance immunity test (150 kHz ~ 80 MHz)

等级	电压	
	$U_{0dB\mu V}$	$U_{0V}$
1	120	1
2	129.5	3
3	140	10
X	开放等级	

为最大限度提高子模块控制器的抗扰度能力, 试验开放等级为骚扰发生设备的最大输出能力, 骚扰信号的开路试验电压有效值 $U_{0V}$ 为20 V, 依据式(3):

$$U_{0dB\mu V} = 20 \log(U_{0V}/1\mu V) \quad (3)$$

计算出射频电磁场感应的骚扰电压 $U_{0dB\mu V}$ 为146 dB $\mu$ V。

### 2.2.1 试验方法

子模块控制器封闭在屏蔽盒内, 内部连接导线完成屏蔽, 控制器与IGBT的连接线封闭在屏蔽盒内, 这些连接线被射频辐射干扰的传导影响可以忽略, 不单独对这些导线进行考核; 控制器与电容、旁路开关、保护晶闸管的接口均为电信号接口, 在阀厅中可能会接收到射频场辐射产生的传导干扰。试验连接线路的原理如图10所示。图中CDN为去耦合装置, 试验时除了被测线路外, 辅助设备与被测品之间都需要安装去耦合装置, 避免试验时辅助设备被干扰, 影响测试结果。

子模块控制器试验不同连接线测量时设备说明如表4所示。

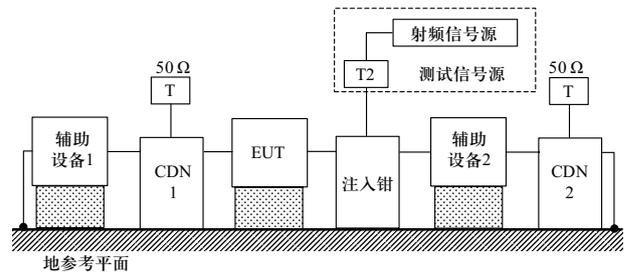


图10 射频传导骚扰抗扰度试验接线简图

Fig. 10 Wiring scheme of RF conducted disturbance immunity test

表4 射频传导试验设备说明表

Table 4 Equipment of RF conducted disturbance immunity test

试验点	辅助设备1	辅助设备2
电容线	旁路开关、保护晶闸管、IGBT	电容
旁路开关线	电容、保护晶闸管、IGBT	旁路开关
保护晶闸管线	电容、旁路开关、IGBT	保护晶闸管

子模块控制器的连接电缆都是非屏蔽电缆, 因此采用电磁耦合钳注入的方法, 电磁耦合钳如图11所示。



图11 电磁耦合钳实物图

Fig. 11 Photo of electromagnetic coupling clamp

电磁耦合钳夹住需要测试的连接线, 指示EUT方向的一端靠近子模块控制器。试验实际接线如图12所示。

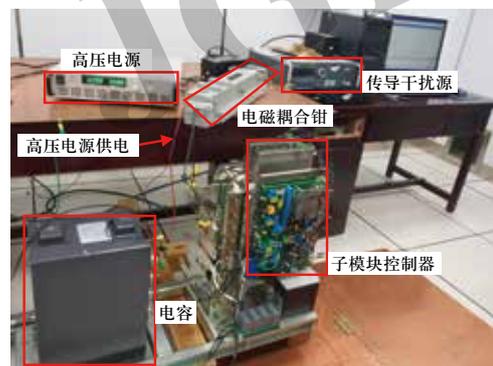


图12 射频传导抗扰度试验实物图

Fig. 12 Experimental setup of RF conducted disturbance immunity test

## 2.2.2 缺陷与改进

电容连接线施加骚扰时, 控制器电压采集波形如图13所示。

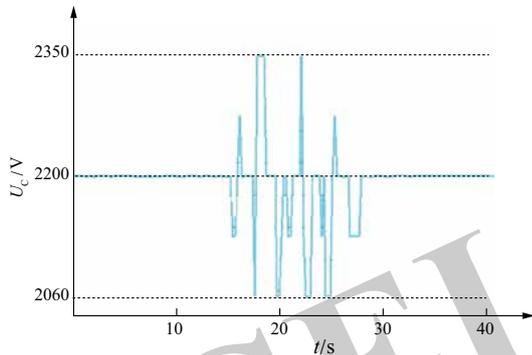


图 13 改进前电容线受传导干扰时采样波形图

Fig. 13 Capacitance voltage waveform when the wire is interfered by RF conducted disturbance before rectification

控制器采集的电压约有 $-140\text{ V}\sim+150\text{ V}$ 左右的频繁波动, 波动最大时的骚扰调制频率约为 $1.2\text{ MHz}\sim 4.2\text{ MHz}$ , 该波动对单个子模块正常运行的影响可以忽略, 其他频段基本无波动。但是换流阀有多个子模块发生波动, 则偏差可达数十kV, 会对系统控制产生影响。

高压电源的输出电压在频段 $1.2\text{ MHz}\sim 4.2\text{ MHz}$ 时, 存在约 $\pm 100\text{ V}$ 的波动, 确定控制器检测电压波动的主要原因是传导骚扰影响了高压电源的输出。为了避免辅助设备被干扰, 试验延长了高压供电电源的输出线和上位机控制光纤, 把上位机控制板和高压电源置于实验室外, 重新测试的结果如图14所示, 电压采集最大波动为 $-10\text{ V}$ , 对子模块控制和换流阀系统控制的影响都可以忽略。

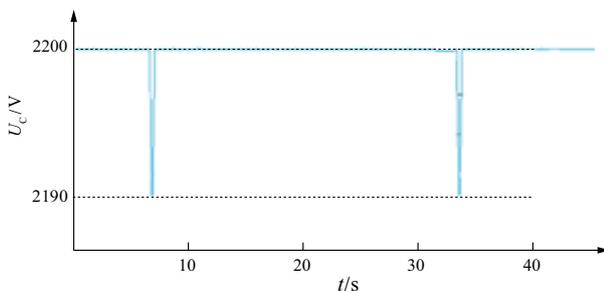


图 14 调整试验布局后电容线受传导干扰时采样波形图

Fig. 14 Capacitance voltage waveform when the wire is interfered by RF conducted disturbance after rectification

## 3 结语

本文根据柔直换流阀阀厅的电磁骚扰特性, 对子

模块控制器进行了针对性的EMC能力考核, 得到如下结论。

1) 柔直换流阀阀厅电磁环境复杂, 主要包含了浪涌干扰和辐射干扰。

2) 子模块控制器过压保护电路作为子模块的主保护电路, 对浪涌等高能干扰比较敏感, 合理配置缓冲器的延时是必要的, 否则可能引起保护误动作, 本文通过增加缓冲器的延时, 提高了子模块控制器的抗浪涌干扰能力。

3) 射频场感应的传导骚扰抗扰度考核的是子模块外部导线, 在特定频段, 干扰会影响高压电源的输出, 本文通过延长高压电源与控制器之间的连接线, 使电源远离干扰源, 控制器通过测试。

该控制器的设计已经应用于厦门示范工程、渝鄂背靠背联网工程, 换流阀运行状态良好, 未出现因子模块控制器受电磁骚扰而旁路的子模块, 进一步验证了控制器EMC能力提升的有效性。

## 参考文献

- [1] 邬雄, 张文亮. 电力系统电磁兼容的技术问题[J]. 高电压技术, 1997, 23(2): 53-55.  
WU Xiong, ZHANG Wenliang. Technical problems on EMC in power system[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(2): 53-55(in Chinese).
- [2] 董正言. 关于输电系统电场和磁场的国际调查报告[J]. 华中电力, 1988, 1(3): 58-63.
- [3] 干喆渊, 邬雄, 张广洲, 等.  $\pm 500\text{ kV}$ 直流输电系统电磁环境调查研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 146-148.  
GAN Zheyuan, WU Xiong, ZHANG Guangzhou, et al. Research on the EM environment of HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 146-148(in Chinese).
- [4] WIGGINS C M, WRIGHT S E. Switching transient fields in substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(2): 591-600.
- [5] 王立辉, 钱佳斌, 嵇建飞, 等. 变电站开关瞬态干扰建模与特性分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 960-965.  
WANG Lihui, QIAN Jiabin, JI Jianfei, et al. Modeling and characteristic analysis of switching transient disturbance in substation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 960-965(in Chinese).
- [6] MOHANA RAO M, THOMAS M J, SINGH B P. Computation of EMI fields in a high voltage gas insulated substation during switching operations[C]//2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No.03CH37446), Boston, MA, USA.
- [7] 黎景辉, 龚有军, 陈冰. 柔性直流与交流线路平行走线工

- 频电磁影响[J]. 中国电力, 2013, 46(9): 96-101.
- LI Jinghui, GONG Youjun, CHEN Bing. Study on power frequency electromagnetic impacts of AC transmission lines on paralleling erected VSC-HVDC transmission lines[J]. Electric Power, 2013, 46(9): 96-101(in Chinese).
- [8] 马为民, 聂定珍, 万保权, 等. 高压直流换流站换流阀电磁干扰的测量[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1317-1323.
- MA Weimin, NIE Dingzhen, WAN Baoquan, et al. Characteristics of electromagnetic disturbance in HVDC valve hall[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1317-1323(in Chinese).
- [9] MARUVADA P S, MALEWSKI R A, WONG P S. Measurement of the electromagnetic environment of HVDC converter stations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1129-1136.
- [10] 蔡敏, 吴蓉晖. 变电站二次设备抗干扰技术的探讨[J]. 湖北电力, 2004, 28(6): 5-7.
- CAI Min, WU Ronghui. Discussion on the anti-inference technology for secondary equipment of substation[J]. Hubei Electric Power, 2004, 28(6): 5-7(in Chinese).
- [11] 巩学海, 何金良. 变电所二次系统电磁兼容抗扰度指标分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2412-2416.
- GONG Xuehai, HE Jinliang. Analysis on electromagnetic compatibility immunity indexes for secondary systems of substation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2412-2416(in Chinese).
- [12] 陈安伟, 陈晓刚, 裘渝涛, 等. 智能变电站的电磁兼容性测试[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 112-115.
- CHEN Anwei, CHEN Xiaogang, QIU Yutao, et al. Electromagnetic compatibility test of smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 112-115(in Chinese).
- [13] 嵇建飞, 袁宇波, 庞福滨. 智能变电站就地智能设备电磁兼容抗扰度实验分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29 (增刊1): 454-462.
- JI Jianfei, YUAN Yubo, PANG Fubin. Experimental analysis of EMC immunity for field installed intelligent equipment of intelligent substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(supplement 1): 454-462(in Chinese).
- [14] STEWART M G, SIEW W H, WALKER K F, et al. Conducted immunity requirements for equipment operational during high voltage network switching operations[J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(5): 391.
- [15] 张晓, 余占清, 罗兵, 等. 雷电脉冲电磁场对电站敏感设备的电磁干扰[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1696-1702.
- ZHANG Xiao, YU Zhanqing, LUO Bing, et al. Electromagnetic interference of lightning pulse electromagnetic field to sensitive equipment in power stations[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1696-1702(in Chinese).
- [16] 孙海峰, 杜林森, 蒋剑, 等. 柔性直流换流系统辐射电磁干扰的测量[J]. 电测与仪表, 2016, 53(19): 42-48.
- SUN Haifeng, DU Linsen, JIANG Jian, et al. Measurement of radiated electromagnetic disturbance of VSC-HVDC converter system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(19): 42-48(in Chinese).
- [17] 刘兵, 阮江军, 韩海宏, 等. 柔性直流输电系统电磁环境分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2747-2752.
- LIU Bing, RUAN Jiangjun, HAN Haihong, et al. Analysis of electromagnetic environment of VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2747-2752(in Chinese).
- [18] 王琦, 刘磊, 崔翔. HVDC换流站二次系统暂态电磁骚扰的测量与计算[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 22-25.
- WANG Qi, LIU Lei, CUI Xiang. Measurement and calculation of the transient electro-magnetic disturbances of secondary system in HVDC converter station[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 22-25(in Chinese).
- [19] 中国国家标准化管理委员会. 电磁兼容试验和测量技术浪涌(冲击)抗扰度试验: GB/T 17626.5—2019 [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2019: 6.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 电磁兼容试验和测量技术射频电磁场辐射抗扰度试验: GB/T 17626.3—2016 [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2016: 12.
- [21] 中国国家标准化管理委员会. 电磁兼容试验和测量技术射频场感应的传导骚扰抗扰度: GB/T 17626.6—2017 [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2017: 12.

收稿日期: 2019-11-22; 修回日期: 2020-02-03。



闻福岳

作者简介:

闻福岳(1982), 男, 高级工程师, 研究方向为直流输电和高电压技术, E-mail: wenfuyue@sgepri.sgcc.com.cn.

卢昭禹(1991), 男, 工程师, 研究方向为电力电子技术及其应用。通信作者, E-mail: luzhaoyu@sgepri.sgcc.com.cn.

(责任编辑 张宇)