

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.09.021

# 基于 RT-LAB 的柔性直流输电系统仿真平台设计

张 群, 赵 倩, 陈 朋

(许继集团直流输电系统公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 基于模块化多电平换流器的柔性直流输电技术以其在功率控制、潮流反转、无功补偿等方面的诸多优势,必将成为未来输配电系统的重要组成部分。但是当系统电压等级较高时,所需开关器件可能会成千上万,传统仿真平台完成不了如此庞大的仿真任务,更不能满足工程测试需求。针对该问题,文中设计了一种针对柔性直流输电系统的实时仿真平台,以实时仿真器 RT-LAB 为基础,配以高速光纤通信接口与被测系统进行数据交互,运用半实物仿真技术完成系统测试。该平台已用于舟山工程极控系统(PCP)和阀控系统(MVCE)的测试,试验结果及工程应用表明,该仿真平台能够完成阀控系统和极控系统实时全功能仿真验证,满足实际工程测试需求。

**关键词:** MMC-HVDC; 输配电; 实时仿真技术(RT-LAB); 实时仿真

## Design of Real Time Simulation Platform Based on RT-LAB for Flexible HVDC System

ZHANG Qun, ZHAO Qian, CHEN Peng

(XJ Electric Co., Ltd., Henan Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Because of its many inherent advantages in power control, power reversal, reactive power compensation and so on, flexible HVDC system based on modular multi-level converter will become an indispensable component of transmission and distribution systems. But with the voltage level getting higher and higher, the number of switching devices of flexible HVDC system will be thousands. The traditional simulation platform has been unable to meet the requirements of simulation and engineering test. To solve this problem, this paper presents a real time simulation platform for this flexible HVDC system. It is based on RT-LAB, exchanges data between RT-LAB and under test systems with high-speed fiber-optic communication interface and completes systems test using semi-physical simulation technology. This platform has been applied in Zhoushan PCP and MVCE test. The test results and engineering application show that this real-time simulation platform can well complete the verification of actual project MVCE and PCP, and can meet the actual engineering test requirements.

**Key words:** MMC-HVDC; power transmission; RT-LAB; real time simulation

## 0 引言

近年来,基于模块化多电平换流器的直流输电(MMC-HVDC)系统由于其能够有效地改善输出波形,降低开关频率及系统总损耗,提高换流系统的效率、可靠性及经济性等优势<sup>[1-3]</sup>,越来越多的受到关注,同时世界范围内越来越多基于 MMC 原理工程开始实施。基于 MMC-HVDC 的直流配电网亦能够解决现有交流配电网面临的分布式新能源接入、负荷和用电需求多样化、潮流均衡协调控制复杂化及

电能供应稳定性、高效性、经济性等方面的问题<sup>[4-5]</sup>。

虽然 MMC-HVDC 在输电和配电领域都具备很广的应用前景,但是其开关器件数量是传统两电平或三电平换流器的上千倍,这对于建模柔性直流输电系统来说是巨大的挑战。

MMC-HVDC 中的阀控系统需要单独控制每个开关器件,导致阀控系统和实时仿真器之间信道多且数据量大,现有的通讯接口已经不能满足要求,故需开发新的实时仿真平台。

RT-LAB 实时仿真系统已经广泛地应用于国内外相关研究机构,文[6]中采用 RT-LAB 实时仿真器完成了随动系统的半实物仿真平台;文[7]中采用

收稿日期:2015-04-20; 修回日期:2015-05-25

RT-LAB 实时仿真器搭建了一套 3 MW 鼠笼式全功率变流器的硬件在环仿真平台,实现了与分布式控制器的无缝连接;文[8]中基于 RT-LAB 搭建了一套多电平变流器系统,通过仿真和试验结果对比表明实时仿真器能够真实模拟变流器系统。相关应用表明 RT-LAB 系统能真实的模拟交直流混合系统的暂稳态过程;文[9]中虽然建立了柔性直流输电数字—模拟混合实时仿真平台,但其更偏重动模系统,且难以扩展到几百电平的 MMC-HVDC 系统。

基于以上背景,文中设计了一种针对柔性直流输电系统的实时仿真平台,主要由实时仿真器(RT-LAB)、极控系统(PCP)、阀控系统(MVCE)和接口设备组成。该实时仿真平台能够精确建模 MMC-HVDC 系统,目前最高可实时仿真 720 电平 MMC-HVDC 系统,且具备功能:①全数字实时仿真功能——极控系统、阀控系统和一次系统完全由实时仿真器完成,在线方便的修改参数,最终使所建模型的参数达到最优;②半实物仿真功能——阀控系统和一次系统由实时仿真器完成或只有一次系统由实时仿真器完成,从而完成实际控制保护平台的验证或控制保护平台和阀控系统的验证。目前,该实时

仿真平台已经完成舟山工程阀控系统和极控系统的实时仿真试验。

## 1 模块化多电平换流器

图 1 为两端 MMC-HVDC 拓扑结构。图 1 中:每相由上下两个桥臂构成,而每个桥臂由  $N$  个子模块和一个电抗器串联而成。每个子模块由两个 IGBT、两个反向二极管、一个快速旁路开关、一个快速晶闸管和一个电容构成,模块化多电平子模块见图 2<sup>[10]</sup>。图 2 中反向二极管用于子模块续流,快速旁路开关用于旁路故障子模块,快速晶闸管用于直流母线极间短路时保护开关器件,电容用于储能,以维持直流母线电压。MMC-HVDC 刚上电工作时通过反向二极管  $D_1$  给子模块电容进行充电。当 MMC-HVDC 正常工作后,必须保证上下桥臂共有  $N$  个子模块投入,即  $N_u + N_l = N$ ,其中  $N_u$  为上桥臂投入子模块数; $N_l$  为下桥臂投入子模块数。MMC 通过触发各相桥臂中相应子模块上的开关器件、调节桥臂电压间的比率并串联叠加各子模块的输出电压,使得在交流侧得到所期望的多电平电压输出,同时在直流侧得到约等于  $U_{dc}$  的电压值,这就是 MMC 的基本控制原则<sup>[11-13]</sup>。

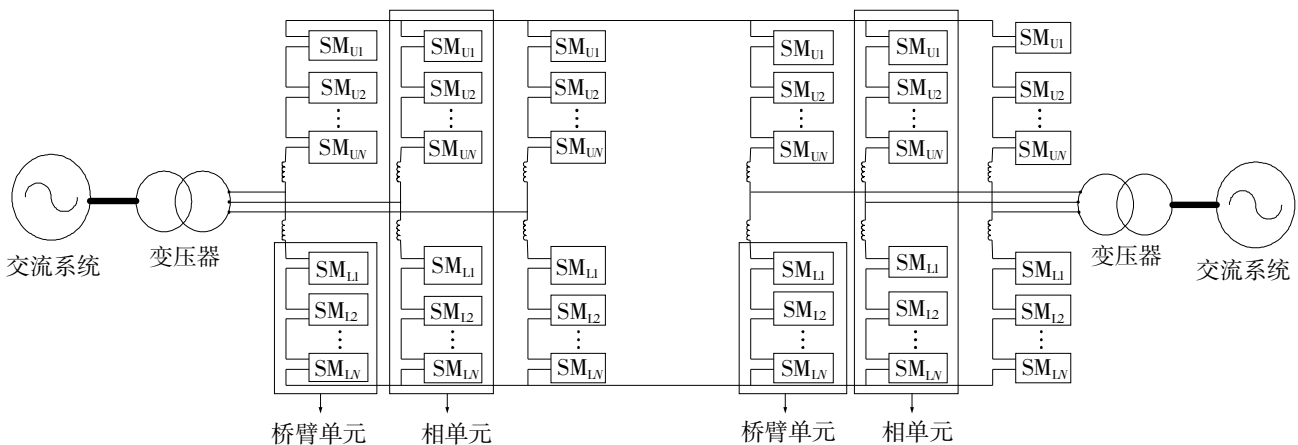


图 1 MMC-HVDC 拓扑结构

Fig. 1 Topology of MMC-HVDC

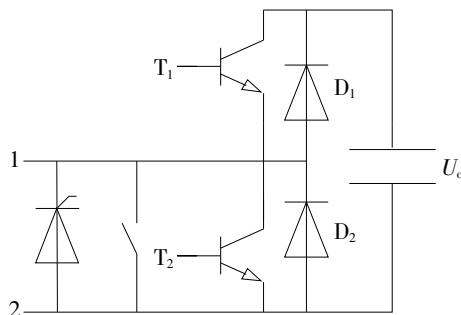


图 2 模块化多电平子模块

Fig. 2 Sub-module of MMC

上下桥臂间电压比率的调节,即  $N_u$ 、 $N_l$  的调节是通过  $T_1$ 、 $T_2$  不同开关状态实现的<sup>[14-15]</sup>。

1)  $T_1$ 、 $T_2$  都闭锁,这时系统处于初始启动状态或故障状态;

2)  $T_1$  导通,  $T_2$  闭锁,子模块电容通过  $T_1$  放电或通过反向二极管  $D_1$  充电,这取决于流过子模块电容的电流方向,此时其输出电压为  $U_c$ ,  $N_u$  增大或  $N_l$  增大;

3)  $T_1$  闭锁,  $T_2$  导通,电流通过  $T_2$  或反向二极管  $D_2$  流通,子模块电容被旁路,此时输出电压为 0,  $N_u$  减小或  $N_l$  减小。

如此,当一个桥臂投入的模块从 0- $N$  变化,另一桥臂投入模块数从  $N$ -0 变化时,AC 侧可得到  $N+1$  电平电压输出。

## 2 实时仿真器

电力系统的复杂性日益增强, 而另一方面市场竞争又在降低产品成本和加快上市时间上对行业人员提出了更高的要求, 大量的系统仿真因此变得不可替代且正在发挥越来越重要的作用<sup>[6]</sup>。实时仿真具有将硬件直接接入控制或测试回路的优势, 使整个开发过程从本质上更接近于实际, 具有更高的置信度, 并且大大缩短了开发周期, 具有较高的经济价值, 因此实时仿真技术及其应用近年来得到了广泛的重视。

RT-LAB 是专为大型电网及电力电子系统的高精度实时仿真, 快速控制原型(RCP)及硬件在环仿真测试(HIL)量身定做的高精度、多处理器实时仿真平台。其继承 RT-LAB 分布式并行处理思路, 基于 Intel®Core™2 Quad 多核处理器和 FPGA 技术, 实现了大型电网的多速率实时仿真, 能在微秒以下的小步长实时运行, 从而精确模拟目前电力系统中的各种电磁暂态<sup>[9]</sup>。应用该系统, 可以直接将 MATLAB/Simulink 建立的模型通过一定的规则转换成为 RT-LAB 可识别的模型。RT-LAB 系统由上位机、目标机和阀组模拟机构成<sup>[16]</sup>, 具体结构见图 3。

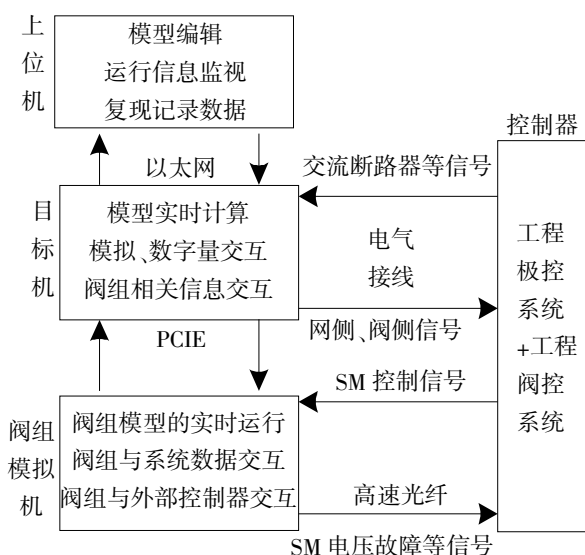


图 3 RT-LAB 系统连接示意图

Fig. 3 Diagram of connection of RT-LAB

图 3 中: 上位机(普通台式机或笔记本)用于搭建系统模型, 即图 1 中完整的柔性直流输电系统, 编译生成 C 代码通过以太网下载到目标机运行, 运行过程中目标机将系统运行信息实时反馈给上位机; 目标机(OP5600)采用 Red Hat 操作系统, 多核分布式并行计算以实现对被控对象的精确模拟, 同时目标机具备模拟 I/O 和数字 I/O 通道以实现与外部控制器的数据交互; 阀组模拟机(OP7020)基于现场可

编程门阵列(FPGA)技术, 可实时模拟柔性直流输电换流阀, 阀组模拟机和目标机通过 PCIe 通道进行信息交互, 同时其具备 16 个高速光纤接口, 最高速率可至 5 GB/s, 以完成与外部控制器的数据交互。

整个 MMC-HVDC 系统过于庞大, 在实际应用中为提高模型的运行效率, 将模型分成几个子模型, 使其能够并行计算。模型中所有顶层子模块必须含有相应前缀, 以区分其功能, 实现不同的子模块在编译后能够放进不同的 CPU 进行并行计算<sup>[17]</sup>。该模型只是实时仿真一次系统具体包含设备及子模块划分见图 4。

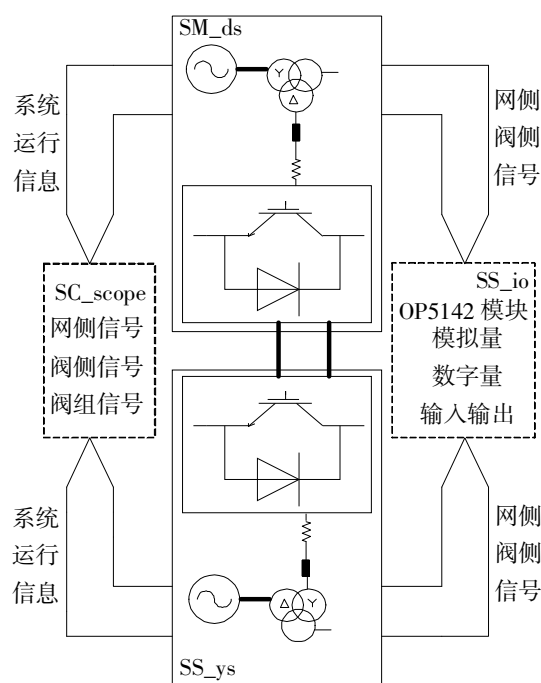


图 4 基于 RT-LAB 的 MMC-HVDC 模型

Fig. 4 MMC-HVDC model based on RT-LAB

图 4 中: SM\_ 为主子模块, 所运行的模型中必须只有一个这样的子模块; SS\_ 为从子模块, 所运行的模型中该子模块可以有也可以没有, 主要依据运行模型的复杂程度; SC\_ 为监视子模块, 即系统运行过程中的相关信息, 只能引到该子模块中进行观察, 需要注意的是该子模块中监视的数据并非实时显示, 若要实时观察数据, 只能通过 RT-LAB 自带模块 OpWrite File, 但该模块只能实时记录数据, 不能实时显示, 只有等系统 Reset 后, 才能观测其记录数据, 即 RT-LAB 系统存在不能连续实时观测运行数据的问题, 这导致其在使用过程中会有不便之处。

## 3 实时仿真平台

实时仿真平台架构见图 5, 舟山工程为 5 端, 文中以岱山站和洋山站为例, 其余 3 端连接方式完全一样。图 5 中控制保护系统采用 DPS2000B 或

HCM3000 平台还可使用其他公司极控系统,在实际测试中采用 DPS2000B 控制保护系统;FS\_PCP 为极控系统和阀控系统协议转换装置以满足不同系列极控系统和阀控系统的连接需求,该装置支持 TDM 协议、IEC 60044-8—2002 协议及阀控系统定义的私有协议等,实际测试过程中采用 TDM 协议和 IEC 60044-8—2002 协议;阀控系统支持任何第三方公司的阀控,实际测试过程中采用专为舟山工程研制

的阀控系统 (MVCE300);FS\_RTLAB 为自主研发的阀控系统和阀组模拟机(OP7020)之间的转接装置,主要完成功能:①协议转换功能。将 RT-LAB 仿真系统所使用协议转换成阀控系统所需协议;②冗余功能。通过对主动信号的识别,实现主备系统的切换,并实现主系统与 RT-LAB 仿真系统的实时数据交互;③同步功能。通过识别主动系统同步信号,保证数据交互的同时性。

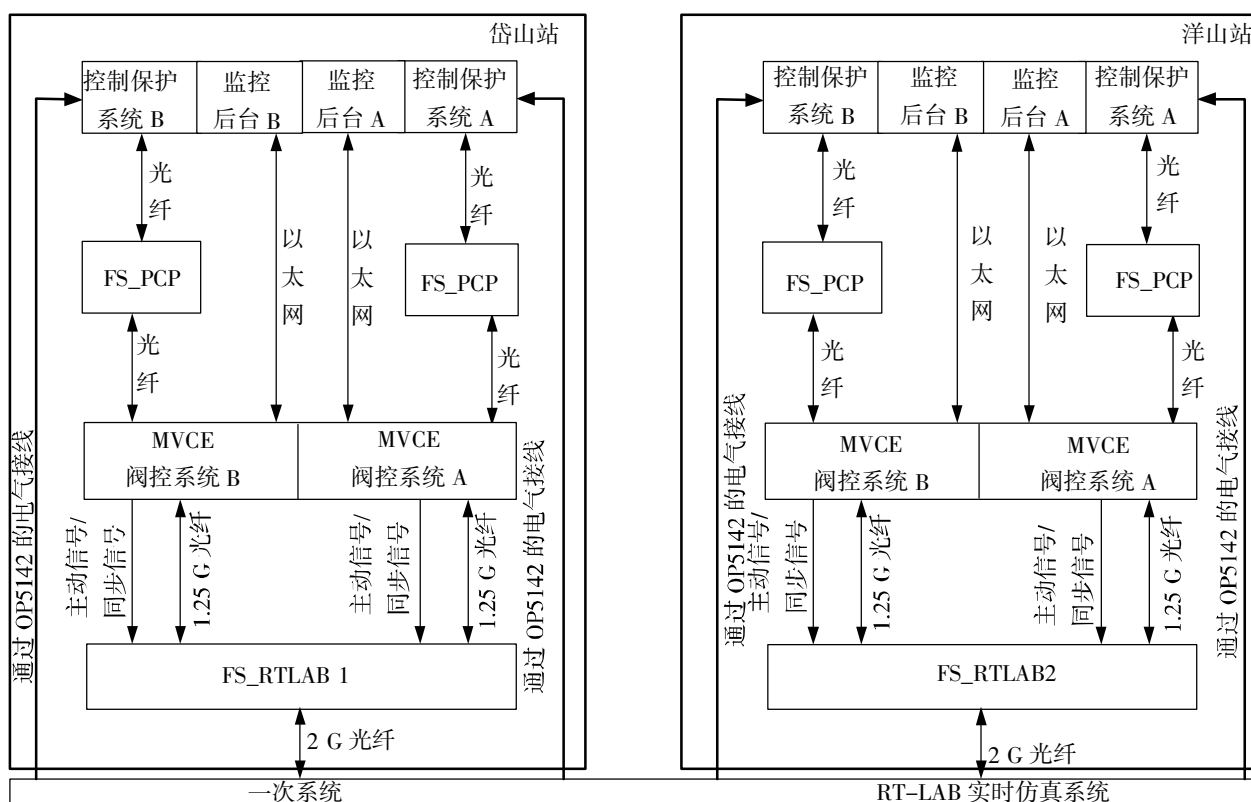


图5 实时仿真平台架构

Fig. 5 Structure of real time simulation platform

RT-LAB 实时仿真系统模型交流系统所用参数

见表1,其余主要一次系统参数见表2。

表1 交流系统参数

Table 1 Parameter of AC system

| 参数        | 岱山    | 洋山    |
|-----------|-------|-------|
| 额定运行电压/kV | 230.0 | 115.0 |
| 最高稳态电压/kV | 242.0 | 117.7 |
| 最低稳态电压/kV | 212.0 | 106.7 |
| 最高极端电压/kV | 242.0 | 121.0 |
| 最低极端电压/kV | 209.0 | 99.0  |
| 最大短路电流/kA | 50.0  | 40.0  |

表2 主电路参数

Table 2 Parameter of main circuit

| 参数       | 岱山              | 洋山             |
|----------|-----------------|----------------|
| 变压器变比    | 230/204.12/10.5 | 115/208.2/10.5 |
| 变压器绕组接法  | Yn,d,d          | Y,yn,d         |
| 桥臂电抗器/mH | 120             | 350            |
| 软起电阻/kΩ  | 9               | 26             |
| 电容/μF    | 6 000           | 2 000          |
| 额定功率/MW  | 300             | 100            |

为了验证工程实际阀控系统控制保护逻辑和动作的可靠性,分别做以下试验:①顺控解锁试验;②功率翻转试验;③直流母线极间短路试验。该试验过程中岱山站为定直流电压控制和定无功功率控制,洋山站为定有功功率控制和定无功功率控制,实时仿真平台试验具体运行波形,见图6-8。

图6-8中各个试验具体步骤为:

1)顺控解锁试验。由于岱山站为控直流电压站,首先,闭合岱山站交流侧断路器,使岱山站处于不控充电阶段<sup>[18]</sup>,即通过并联二极管给予模块电容进行充电,待不控充电阶段完成后,闭合与旁路电阻并联的隔离开关,岱山站解锁换流器,完成顺控解锁流

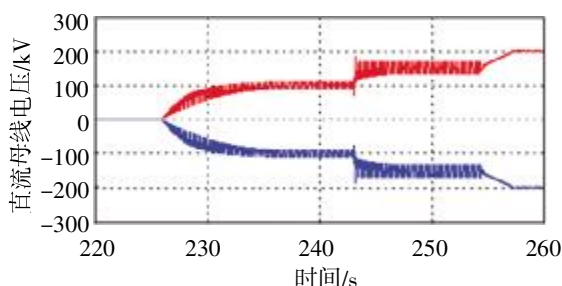


图6 顺控解锁试验

Fig. 6 Sequence control unlock experiment

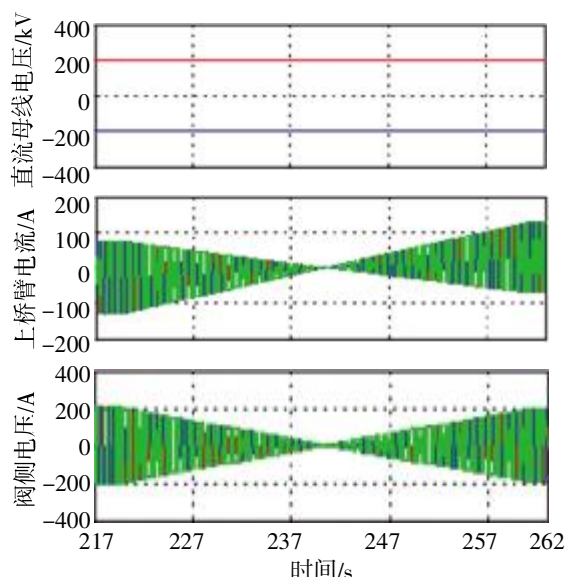


图7 功率翻转试验

Fig. 7 Power reversal experiment

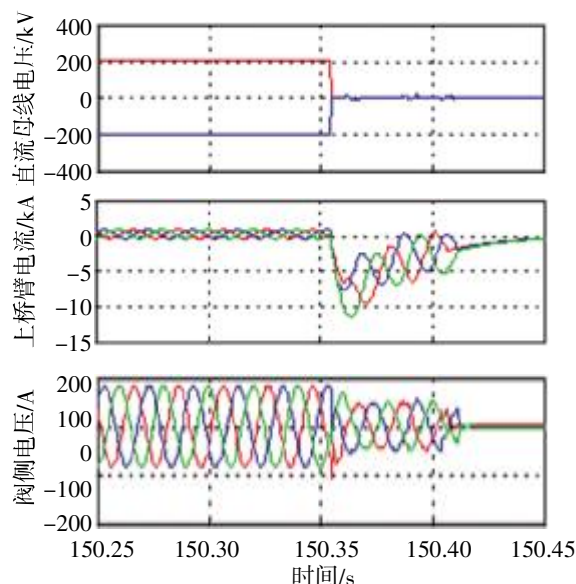


图8 直流母线极间短路故障试验

Fig. 8 Line-to-line DC fault experiment

程。再依次闭合洋山站交流侧短路器,旁路电阻并联隔离开关,洋山站解锁换流器,从而实现系统解锁运行,该试验能够验证极控系统和阀控系统的基本控制功能<sup>[9]</sup>。洋山站顺控解锁试验波形见图6。

2)功率翻转试验。虽然舟山工程中洋山站只是

作为受端,但是 MMC-HVDC 主要优势之一就是不改控制配置和电路结构的前提下,通过反向直流电流即可实现潮流反向,故在实时仿真平台上进行功率翻转试验,以验证其效果,由于实际工程中上升速率最高为 100 MW/min,整个功率翻转过程需要 2 min 才能完成,为了提高试验速度,将功率上升速率提高到 500 MW/min,该试验能够验证极控系统的控制功能,洋山站功率翻转波形见图7,洋山站开始处于吸收 100 MW 有功功率稳态,然后进行功率反送,最终保持在发出 100 MW 有功功率稳态,整个过程持续了 24 s,既验证了系统的实时性,又验证了系统可靠性。

3)直流母线极间短路试验。目前,MMC-HVDC 系统中最严重的故障即为直流母线极间短路故障<sup>[20]</sup>。由于 MMC-HVDC 拓扑结构的特点决定,只要有该故障发生,只能导通晶闸管并闭锁换流阀,进而停运整个系统,该试验主要验证阀控系统的保护功能,洋山站具体结果见图8,开始洋山站处于接收 100 MW 有功功率稳态,在某一时刻人为将直流母线极间短路,此时阀控系统先于极控系统检测到此故障,故阀控保护换流阀闭锁并导通晶闸管。交流侧断路器并未断开,阀侧电流和桥臂电流均明显过流,验证了直流母线极间短路故障时,需同时断开进线断路器。

## 4 结语

文中基于 RT-LAB 实时仿真器设计了针对柔性直流输电系统的实时仿真平台,满足实际工程中对极控系统和阀控系统的实时全功能验证需求。通过自主开发的接口设备(FS\_PCPFS\_RTILAB)实现了对不同厂家不同型号的极控系统和阀控系统进行验证。实验结果表明,RT-LAB 实时仿真器不仅能够精确模拟一次系统相关设备,且还能显著地减少系统仿真时间,满足舟山工程阀控系统测试要求,同时该平台易扩展,也能满足未来柔性直流输电工程测试需求。

## 参考文献:

- [1] 冯明,李兴源,李宽,等.多端柔性直流输电系统启动控制及其仿真[J].电力系统保护与控制,2013,41(14): 60-65.  
FENG Ming, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. Control and simulation of VSC-MTDC start-up procedure [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 60-65.
- [2] MARQUARDT R, LESNICAR A. New concept for high voltage-modular multilevel converter[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004: 1-5.

- [3] 阎发友,汤广福,贺之渊,等. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 397-404.  
YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. An improved droop control strategy for MMC-based VSC-MTDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 397-404.
- [4] 江道灼,郑 欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.  
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [5] 宋 强,赵 彪,刘文华,等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.  
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [6] 常晓飞,符文星,闫 杰. 基于 RT-LAB 的某型导弹半实物仿真系统设计[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18): 5720-5723.  
CHANG Xiaofei, FU Wenxing, YAN Jie. Design of missile hardware-in-the-loop simulation system based on RT-LAB [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(18): 5720-5723.
- [7] 何 舜,张建文,蔡 旭. 风电变流器的 RT-LAB 硬件在环仿真系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 43-48.  
HE Shun, ZHANG Jianwen, CAI Xu. Realization and design of wind power converter model based on RT-LAB HIL system [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 43-48.
- [8] GREGOIRE L, AL-HADDAD K, NANJUNDAIAH G, et al. Hardware-in-the-loop to reduce the development cost of power electronic converters [C]//2010 India International Conference on Power Electronics (IICPE). India: IEEE, 2010: 1-6.
- [9] 刘 栋,汤广福,贺之渊,等. 模块化多电平柔性直流输电数字—模拟混合实时仿真技术 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 68-73.  
LIU Dong, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Hybrid real-time simulation technology for MMC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 68-73.
- [10] HAGIWARA M, AKAGI H. Control and experiment of pulsewidth-modulated modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (7): 1737-1746.
- [11] LIU Ximei, ZHANG Qun, Zhao Qian, et al. Research on deadbeat control strategy of modular multilevel converter [C]//2011 International Conference on Transportation and Mechanical & Electrical Engineering. China: Changchun, IEEE, 2011: 621-624.
- [12] MUNCH P, GORGES D, IZAK M, et al. Integrated current control, energy control and energy balancing of modular multilevel converters [C]//IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. USA: IEEE, 2010: 150-155.
- [13] 刘钟淇,宋 强,刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.  
LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 53-58.
- [14] 刘钟淇,宋 强,刘文华. 新型模块化多电平变流器的控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 5-7.  
LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. Research on control of the novel modular multilevel converters [J]. Power Electronics, 2009, 43(10): 5-7.
- [15] 赵成勇,陈晓芳,曹春刚,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 82-87.  
ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang, CAO Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87.
- [16] 汪 谦,宋 强,许树楷,等. 基于 RT-LAB 的 MMC 换流器 HVDC 输电系统实时仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 36-40.  
WANG Qian, SONG Qiang, XU Shujie, et al. Real-time simulation of MMC based HVDC power transmission system using RT-LAB [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51 (1): 36-40.
- [17] 周 林,贾芳成,郭 珂,等. 采用 RT-LAB 的光伏发电仿真系统试验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2814-2820.  
ZHOU Lin, JIA Fangcheng, GUO Ke, et al. Testing analysis on a kind of PV Generation simulation system using RT-LAB [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36 (11): 2814-2820.
- [18] 周 建,苏建徽,王新颖. 模块化多电平换流器的预充电控制[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 103-107.  
ZHOU Jian, SU Jianhui, WANG Xinying. Pre-charging control of modular multilevel converter [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 103-107.
- [19] 华 文,赵晓明,黄晓明,等. 模块化多电平柔性直流输电系统的启动策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 51-57.  
HUA Wen, ZHAO Xiaoming, HUANG Xiaoming, et al. A startup strategy for modular multilevel converter based HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 51-57.
- [20] 章正国,张 健,宣 羿,等. 基于 MMC 平均值模型的柔性直流输电系统海底电缆故障过电压计算 [J]. 高压电器, 2014, 50(2): 99-104.  
ZHANG Zhengguo, ZHANG Jian, XUAN Yi, et al. Over-voltage calculation of submarine cable in VSC-HVDC systems based on MMC average value model [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2): 99-104.

张 群(1988—),男,硕士研究生,工程师,研究方向为柔性直流输电技术。