

基于 MMC 的柔性直流输电站级控制器的 设计及其动模实验

罗 程, 赵成勇, 张宝顺, 倪晓军, 翟晓萌, 郭春义

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

The Design of Station Controller of Flexible HVDC Based on MMC and Its Dynamic Simulation Experiment

LUO Cheng, ZHAO Chengyong, ZHANG Baoshun, NI Xiaojun, ZHAI Xiaomeng, GUO Chunyi

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

摘 要: 站级控制器是模块化多电平换流器柔性直流输电控制系统的核心部分, 与上位机、下层控制器协同配合实现柔性直流输电的可靠控制。对基于 MMC-HVDC 站级控制器主要功能进行了分析, 提出了一种站级控制器硬件结构设计方案, 并针对该硬件结构以及功能需求设计了软件程序逻辑。研制了基于该站级控制器的 4kV/100kW 的 MMC-HVDC 实验样机, 在样机上进行稳态实验以及电压阶跃实验, 结果表明系统能够正确快速进行有功类无功类物理量的调节, 并能对交流系统故障以及控制器通信故障进行清除, 验证了站级控制器硬件结构及程序逻辑的正确性。

关键词: 柔性直流输电; 模块化多电平换流器; 站级控制器; 实验样机

Abstract: The station controller is the core of flexible HVDC control system for modular multilevel converter (MMC), which is coordinated with the host computer and lower controller to realize the reliable control of flexible HVDC transmission. In this paper, the main function of station controller based on MMC-HVDC is analyzed, and the hardware architecture design scheme of station controller is proposed. In addition, the software program logic is designed according to the hardware scheme and functional requirement. Furthermore, a 4kV/100kW MMC-HVDC experimental prototype based on the designed station controller is developed, on which several stability and voltage experiments are carried out. The results show that the system can quickly regulate active and reactive physical quantities,

and protect system from AC system fault and controller communication fault, which verify the correctness of the designed hardware configuration and program logic of station controller.

Keywords: flexible HVDC; modular multilevel converter (MMC); station controller; experimental prototype

0 引 言

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)区别于以往由多个开关器件直接串联构成的两电平、三电平电压源换流器(voltage source converter, VSC)结构^[1-2], 采用子模块级联的方式有效降低了串联绝缘栅双级型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)器件的损耗、降低交流侧谐波含量, 另外这种结构也避免了两电平三电平电压源换流器中大量 IGBT 串联所引起的系统可靠性的问题^[3-5]。

MMC 结构自提出以来, 得到了广泛的关注与研究, 包括建模^[6-7]、调制策略^[8-10]、电容均压^[11-13]、保护^[14]等, 在理论研究上取得了巨大进展, 而针对 MMC 物理系统及控制器的研究较少, 文献 [15] 介绍了基于南澳柔性直流输电示范工程的背靠背大功率柔性直流输电样机。文献 [16] 给出了一种柔性直流输电阀基控制器的设计思路, 并指出柔性直流输电中的阀基控制器与传统直流输电中阀基控制设备的区别。文献 [17] 建立了基于 MOSFET 的 MMC 样机, 采用光纤隔离测控复用电路有效地降低了光纤通道数, 并且保证了全控器

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(SS2013 AA050105); 国家自然科学基金项目(51177042)

件触发的可靠性,但未对站级控制器的设计进行详细介绍。文献[18]介绍了 Trans Bay Cable 工程的建模过程,但并未对其物理系统及控制器结构进行介绍。

本文设计了基于 MMC 的柔性直流输电站级控制器,首先分析了其基本功能,包括有功类无功类物理量控制,系统级保护以及与上位机、阀基控制器的数据通信。在站级控制器硬件结构上采用数字信号处理器(digital signal processor, DSP)与现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)配合使用的设计方案,提高了系统物理控制器的控制精度,同时保证了数据传输的速度。在软件程序上,根据两块芯片实现的功能分别进行程序逻辑设计,比例积分(proportional-integral, PI)调节器采用离散式 PI 算法,有效地防止了控制中的偏差积累,另外利用 DSP 的外部中断设计了快速切除故障通道,进一步保证了系统运行的安全性。基于该站级控制器,研制了 4kV/100kW 的 MMC-HVDC 实验样机,对样机进行稳态实验以及电压阶跃实验,结果表明系统能够正确快速进行有功类无功类物理量的调节,并能实现交流系统故障保护以及控制器通信故障保护等功能。

1 MMC 基本拓扑及控制器架构

1.1 MMC 基本拓扑

三相模块化多电平换流器拓扑结构及其子模块结构如图1所示,其每个桥臂由 N 个子模块级联构成,上下桥臂组成一个相单元,每个桥臂串联一个电抗器 L 。

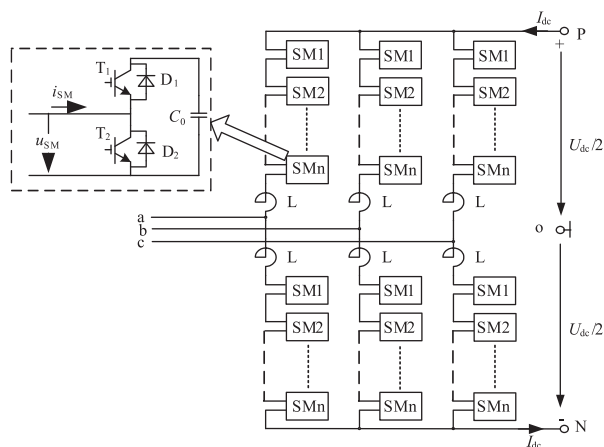


图1 三相模块化多电平换流器拓扑结构

子模块运行状态根据其内部两个 IGBT 器件的通断状态分为投入、切除和闭锁 3 种: ① T_1 导通 T_2 关断, 子模块输出电压为内部电容电压, 此时为投入状态; ② T_1 关断 T_2 导通, 子模块对外呈现零电压, 此时为切除状态; ③ T_1 与 T_2 均闭锁, 这种工作状态为非正常工作状态, 用于 MMC 启动时向子模块电容进行预充电, 或者用于系统故障时保护换流器, 此时为闭锁状态。

1.2 MMC-HVDC 物理控制器架构

MMC-HVDC 物理控制可分为系统级控制、站级控制、阀级控制、子模块级控制。其中系统级控制为 MMC-HVDC 控制系统的最高层, 产生有功类和无功类物理量参考值作为下一层控制的输入参考量。换流器站级控制根据系统级控制所下发的有功和无功类物理量参考值, 得到调制波, 提供给下一层的阀级控制。这是 MMC-HVDC 系统控制中的核心部分, 也是本文研究的主要内容。换流器阀级控制根据站级控制生成的调制波, 采用适当的调制方法和电容电压平衡控制策略生成控制命令。子模块级控制接收来自阀级控制的命令, 通过对控制命令的解码产生触发脉冲, 最终实现对子模块 IGBT 的控制。

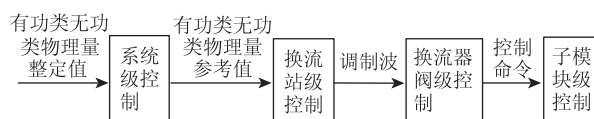


图2 MMC-HVDC 物理控制器结构示意图

2 站级控制器设计

2.1 站级控制器基本功能

站级控制器作为控制系统核心部分, 承担着有功类无功类物理量的控制、系统级保护以及与上位机、下层控制器通信的功能。

站级控制器最基本的功能是实现系统有功类无功类物理量的控制, 对于 VSC 型换流器, 目前常用的控制策略主要分为间接电流控制和直接电流控制两大类。间接电流控制是根据所控制物理量的实际测量值和参考值之间的偏差值, 直接经由 PI 控制器得到相应的调制比 M 和移相角 δ 两个物理量。直接电流控制包括外环电压控制和内环电流控制两大部分。外环电压控制根据 MMC-HVDC 系统级控制目标可以实现定交流电压、定无功功率、定有

功率、定直流电压和定交流系统频率等控制模式,而内环电流控制用于实现交流侧电流波形和相位的直接控制,以快速跟踪参考电流。

站级控制器还承担着系统保护的功能,保护主要分为两类,一类是系统电气量过限保护,另一类是控制器通信故障保护。系统电气量过限包括电源侧、阀侧各相电压过压,各相电流过流,桥臂电流过流,直流电压过压以及直流电流过流。在站级控制器中比较交流电气量有效值、直流电气量平均值与设定保护值,实现系统的电气量过限保护。控制器通信故障包括站级控制器与阀基控制器通信故障,阀基控制器与子模块控制器通信故障等。当系统监测到这些故障,会通过快速切除故障通道进行保护响应,快速切除故障通道将在 2.3 节详述。

站级控制器在运行中需要与阀级控制以及上位机进行数据通信,配合完成控制任务。站级控制器与阀基控制器之间通过自定义的串行通信协议进行通信,站级控制器将系统运行状态、调制比 M 与移相角 δ 、桥臂电流方向、周期同步信号传至阀基控制器,阀基控制器将子模块电容电压、子模块状态、桥臂故障类型、桥臂故障信号送至站级控制器。站级控制器与上位机之间通过以太网进行通信,站级控制器将子模块电容电压、子模块状态(过温、过压、欠压、IGBT 故障以及通信故障)、桥臂故障类型、一次系统运行参数(变压器电流电压、桥臂电流、直流电压电流、有功功率以及无功功率)、桥臂故障信号、调制比 M 与移相角 δ 、系统运行状态传给上位机用于显示,上位机将有功类无功类物理量参考值、PI 调节器比例与积分常数、保护整定值下发至站级控制器。

2.2 站级控制器硬件结构设计

随着大规模集成电路技术的发展,采用 FPGA 与数字信号处理器 DSP 配合进行控制已经成为一种趋势。与 DSP 基于顺序执行指令的方式不同,FPGA 是基于大规模数字电路的并行硬件实现^[19],可以做到实时处理数据。

站级控制器采用 DSP 与 FPGA 配合使用的硬件架构,其中 DSP 主要负责与上位机的数据通信及系统保护功能。FPGA 实现系统的间接/直接电流控制以及与下层阀基控制器的通信功能。FPGA 采用 altera 公司的 EP3C25F324,即图 3 中的①;DSP 采用 TI 公司的 TMS320F28335,即图 3 中的②;DSP 与 FPGA 之间采用 16 位数据总线通信结

构。DSP 与上位机的通信采用 WIZnet 公司的 W5300 芯片进行以太网通信,即图 3 中的③,④为以太网硬件接口。另外,采用 RS485 作为开关量通信接口,实现开关的快速动作以及开关量状态的及时返回,即图 3 中的⑤。FPGA 与下层阀基控制器间的通信依靠背板信号传输实现,图 3 中的⑥为背板信号以及板级电源接口。

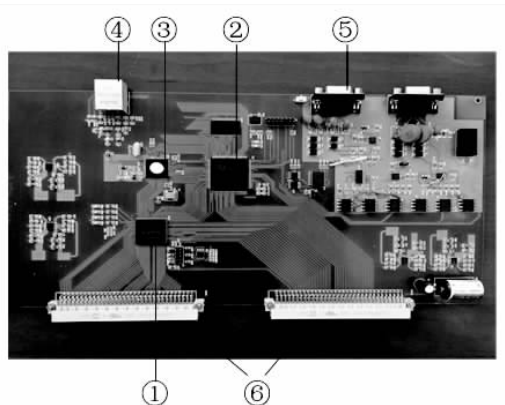


图 3 站级控制器电路板

2.3 站级控制器程序设计

根据 DSP 与 FPGA 所实现功能的不同,分别进行程序逻辑设计。DSP 程序逻辑架构如图 4 所示,FPGA 程序逻辑架构如图 5 所示。

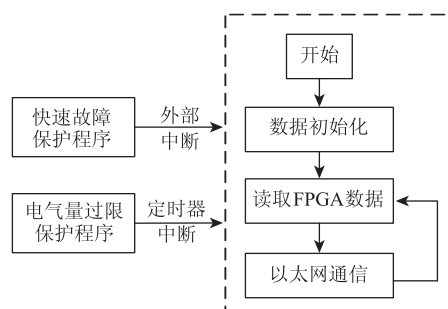


图 4 DSP 程序逻辑架构

DSP 在主程序中轮询读取 FPGA 数据,并通过以太网通信程序与上位机进行通信,保证上位机数据显示的实时性。保护功能通过中断实现,针对过电压过电流之类的电气量超限故障,设置定时器中断程序,在定时器中断程序中,对电气量是否超限进行检测,为了防止保护误动作,在程序中设置若电气量连续超过限值两次才会进行保护的逻辑,这样的设置有效降低了系统保护误动率。针对控制器通信故障,设置外部中断程序,将所有的控制器通信故障在 FPGA 中进行或运算,如果出现

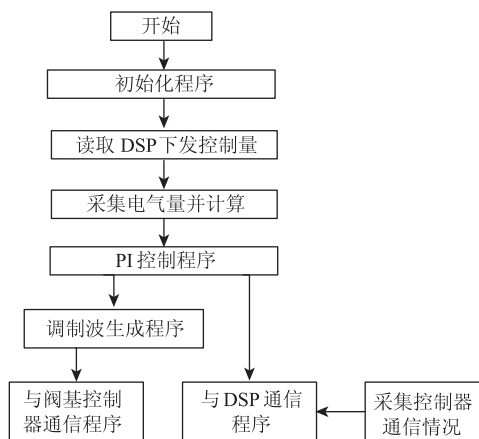


图5 FPGA程序逻辑架构

任意一种故障，则向 DSP 特定引脚发送低电平信号，监测到低电平信号后 DSP 进行系统保护动作。通过这两种保护的相互配合，实现了系统的安全可靠运行。

FPGA 主要功能是实现有功类无功类物理量的控制，其控制需要上位机提供的有功类无功类变量的参考值、PI 调节器的比例与积分常数、由采样芯片提供的相关电气量的实际值，可分别通过读取 DSP 下发控制量程序段以及采集电气量计算程序段完成，经过 PI 控制程序的计算，得到调制比和移相角，再经过调制波生成程序，产生调制波，通过与阀基控制器的通信程序，将生成的调制波送至阀

基控制器，进行下一级控制。将 PI 程序计算得到的调制比和移相角直接通过与 DSP 的通信程序，送至 DSP，进而送至上位机显示，用于 PI 控制器的调节。另外，在 2.1 中提到的站级控制器的保护功能中的控制器通信故障保护也需要 FPGA 的配合，FPGA 通过采集控制器的通信情况，判断有无故障，若存在故障，则通过置低 DSP 中特定引脚，实现 DSP 的外部中断。

针对 PI 控制器的调节，采用离散化的增量式 PI 控制算法，可以有效地防止偏差积累，且易于编程实现^[20]。

3 实验样机及其动模实验

3.1 实验样机

基于该站级控制器的设计思想，研制了 MMC-HVDC 实验样机。实验样机接线如图 6 所示，为降低对实验室电源的要求，系统采用环网运行结构，两列均为 21 电平 MMC 换流器，每桥臂串联 22 个子模块，其中 2 个子模块为热备用，开关器件采用 IGBT，两列 MMC 系统之间通过直流电缆连接，直流线路路上装有开关。电源侧设置有调压器，可用来测试系统在不同电压下的运行工况。另外，在系统的交流侧和直流侧预留了多个外部接口，可用来进行故障设置以及多端柔性直流输电系统的扩展。

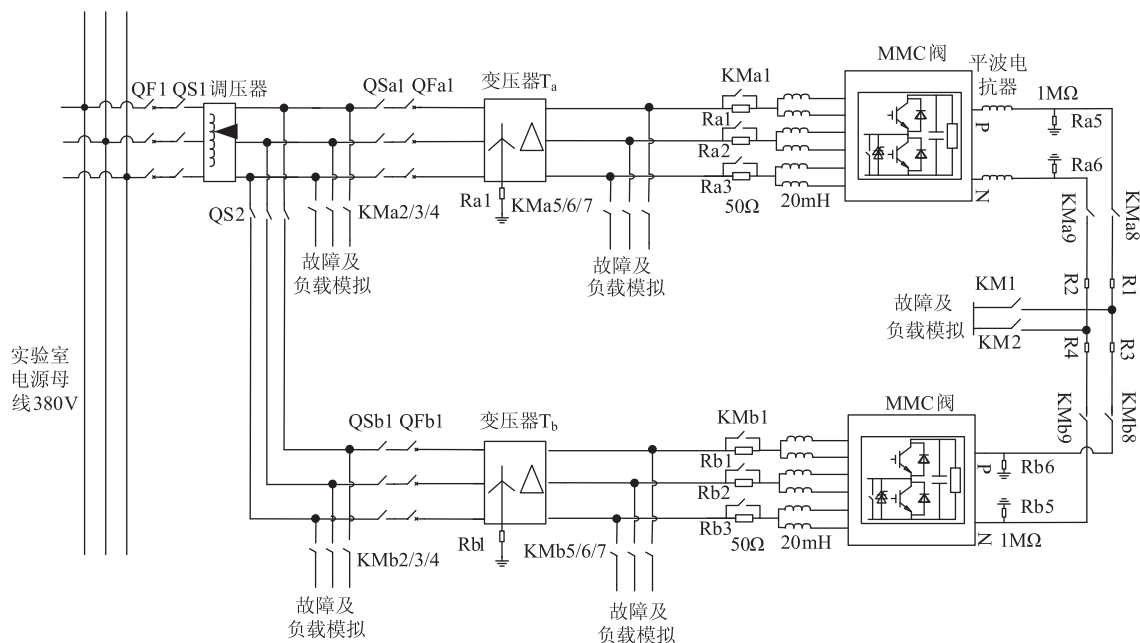


图6 MMC实验样机

表 1 为实验样机一次部分参数。

表 1 实验样机一次部分参数

交流侧参数	参数值	直流侧参数	参数值
额定电压/V	380	电平数/个	21
额定有功功率/kW	100	额定电压/kV	4
变压器/(V/V)	380/2 000	额定电流/A	25
限流电阻/ Ω	50	平波电抗/mH	15
桥臂电抗/mH	20	线路阻抗/ Ω	2

3.2 双端稳态运行实验结果

启动时,先对 MMC 系统的两列分别进行充电,待充电完毕后,切除充电电阻,再分别对两端进行解锁操作使之运行于正常工况下,此时实验室电源为两端换流器提供无功功率及有功功率损耗。运行稳定以后,将直流线路上的开关闭合,并将其中一端切换至定有功功率模式,实现了功率的环网流动。

上位机设定直流电压参考值为 4kV 输送功率参考值为 30kW,录波设备监测到的波形如下图所示。图 7 为定直流电压端阀侧 A 相交流电流波形,其测量有效值为 8.62A。图 8 为定有功功率端换流器出口电压波形,系统为 21 电平,因此阀侧电压波形呈较平滑正弦波,其测量有效值为 1.1kV,由于模拟量的采集未进行滤波处理,电流电压波形谐波含量较大。图 9 为定直流电压端测得的直流电压波形,其值稳定在 4kV,可看出定直流电压控制能够很好地稳定直流电压。图 10 为直流线路传输有功功率波形,其值稳定在 30kW 左右,定有

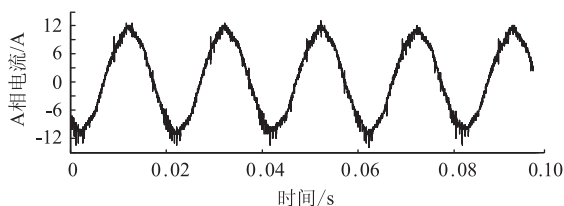


图 7 阀侧 A 相电流

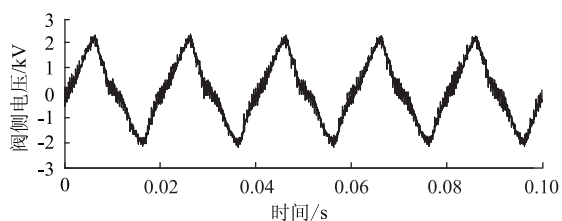


图 8 换流器出口 A 相电压

功率控制效果良好。图 11 为子模块电压波形,子模块电压变化平稳,说明均压策略的有效性。

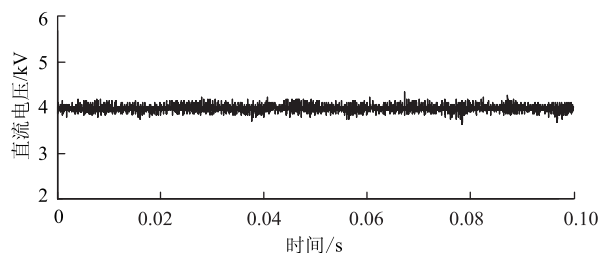


图 9 直流电压

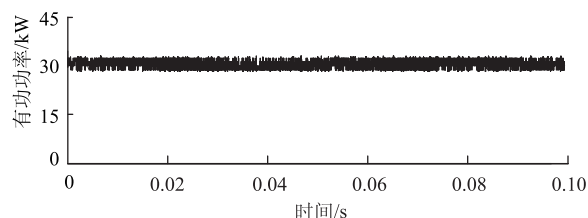


图 10 有功功率

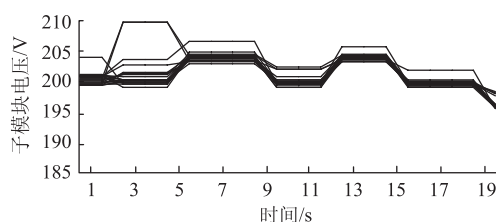


图 11 子模块电压

3.3 电压阶跃实验结果

为了验证系统的动态性能,对系统进行直流电压阶跃实验。先使系统运行于 2kV/10kW 的稳态工况下,将定直流电压端的直流电压参考值从 2kV 阶跃至 2.5kV,系统经过 1s 达到新的稳定状态,直流电压稳定在 2.5kV。图 12 为直流电压阶跃实验结果。

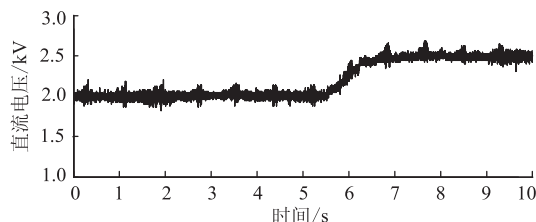


图 12 直流电压阶跃

由上述实验结果知,MMC 实验样机可以有效地控制直流电压、输送功率并且具备一定的动态响应能力,验证了本文设计的站级控制器在系统

控制上的正确性。

4 结束语

本文针对 MMC 物理系统的站级控制器进行了研究, 并通过在样机系统中对研制的站级控制器进行稳态实验以及电压阶跃实验, 验证了所设计站级控制器硬件结构的合理性以及程序逻辑的正确性。该站级控制器在硬件结构上采用 DSP 与 FPGA 配合的设计方案, FPGA 的硬实时并行处理数据保证了控制的实时性。在软件结构上分别对各芯片进行程序逻辑设计, 实现了有功类无功类物理量控制以及系统保护等功能, 另外在保护中引入快速切除故障通道, 使保护在下层控制器出现通信故障时也能够迅速动作, 保证了系统运行的安全性。

参考文献

- [1] Lesnicar A, Marquardt R. A new modular voltage source inverter topology [C]//10th European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, France, 2003.
- [2] Lesnicar A, Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [C]//Proceedings of IEEE Power Tech Conference, Bologna, Italy, 2003.
- [3] Ding Guanjun, Tang Guangfu, He Zhiyuan, et al. New technologies of voltage source converter (VSC) for HVDC transmission system based on VSC [C]//IEEE PES General Meeting, Pittsburgh, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [4] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述 [J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.
- [5] 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: 13-17.
- [6] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平电压源换流器的数学模型 [J]. 中国电机工程学报, 2011(24): 1-8.
- [7] 刘栋, 汤广福, 郑建超, 等. 模块化多电平换流器小信号模型及开环响应时间常数分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 1-8.
- [8] 郭春义, 赵成勇. 电压源换流器高压直流输电的控制策略及其参数优化 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(15): 1-9.
- [9] Makoto Hagiwara, Hirofumi Akagi. Control and Experiment of Pulsewidth-Modulated Modular Multilevel Converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7): 1737-1746.
- [10] 丁冠军, 汤广福, 丁明, 等. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 21(36): 1-8.
- [11] 赵昕, 赵成勇, 李广凯, 等. 采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 48-55.
- [12] 管敏渊, 徐政. MMC 型 VSC-HVDC 系统电容电压的优化平衡控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 9-14.
- [13] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 15-20.
- [14] 董云龙, 包海龙, 田杰, 等. 柔性直流输电控制及保护系统 [J]. 电力系统自动化, 2011(19): 89-92.
- [15] 徐长宝, 耿亮, 王大力, 等. 基于 MMC 柔性直流输电背靠背样机的研制 [J]. 电气技术, 2013(12): 33-38.
- [16] 高阳, 刘栋, 杨兵建, 等. 基于 MMC 的柔性直流输电阀基控制器及其动模试验 [J]. 电力系统自动化, 2013, 30(15): 53-58.
- [17] Zhou Yuebin, Jiang Daozhuo, Hu Pengfei. A prototype of Modular Multilevel Converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3267-3278.
- [18] Teeuwsen S P. Modeling the Trans Bay Cable Project as voltage-sourced converter with modular multilevel converter design [C]//Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA: IEEE, 2011: 18.
- [19] 朱军, 高清维, 韩璐. 基于 DSP 和 FPGA 的数据通信实现方案 [J]. 电子测量技术, 2009, 32(1): 102-104.
- [20] 杭丽君, 姚文熙, 吕征宇. 增量式数字 PI 环在双向 DC/DC 变换器中的应用 [J]. 电力电子技术, 2004, 38(3): 42-44.

收稿日期: 2014-04-14

作者简介:

罗程(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电, E-mail: luocheng_ncepu@gmail.com;

赵成勇(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为直流输电、电能质量分析与控制等。

(责任编辑: 杨秋霞)