

DOI: 10.7667/PSPC150525

MMC 控制系统中子模块控制器的设计

邢长达, 郭家虎, 朱成杰, 梁克靖

(安徽理工大学, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了保证模块化多电平变换器(Modular Multilevel Converters, MMC)的正常工作, 实现电容电压的平衡控制, 设计了 MMC 控制系统中的子模块控制器。首先阐述了 MMC 控制系统的总体结构和工作原理, 介绍子模块控制器在 MMC 控制系统中的作用。然后介绍了子模块控制器的主要硬件模块和软件部分的设计, 着重介绍了在硬件上实现对 IGBT 的欠压与过流保护和用软件产生带死区保护的 PWM 驱动脉冲。最后在基于 MMC 的直流/交流(DC-AC)变换器实验平台上验证了设计的子模块控制器的合理性和可行性。

关键词: 模块化多电平换流器; 控制系统; 电容电压; 子模块控制器; 直流/交流变换器

Design of the sub-module controller of the MMC control system

XING Changda, GUO Jiahu, ZHU Chengjie, LIANG Kejing

(Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to ensure the normal work of Modular Multilevel Converters (MMC) and realize the capacitor voltage balancing, a sub-module controller in MMC control system is designed. First, the overall structure and working principle of MMC control system are described and effect of the sub-module controller in MMC control system is introduced. Then the design of main hardware modules and software module of the sub-module controller is presented, the implementation of the undervoltage and overcurrent protection for IGBT in hardware and PWM driven pulse with dead zone protection generated by using software are emphatically introduced. Finally, the rationality and feasibility of the sub-module controller is verified based on DC-AC converter of MMC experimental platform.

Key words: MMC; control system; capacitor voltage; sub-module controller; DC-AC converter

0 引言

MMC 作为一种新型的电压变换装置, 具有输出谐波少^[1]、模块化程度高^[2]、灵活性强等特点, 它把多个子模块功率单元级联在一起^[3], 叠加输出很高的电压, 在电力系统中具有广泛的应用前景^[4]。

由于具有公共直流母线, MMC 可以应用于背靠背高压直流输电系统中^[5-6], 所以基于 MMC 的高压直流输电系统成为了柔性直流输电领域的研究热点^[7-9]。文献[10]提出了基于 MMC 的大型光伏并网系统结构, 旨在解决当前大型光伏并网系统存在的一些问题, 如孤岛效应、谐波污染等。

MMC 装置的系统设计主要包括主电路部分和控制系统部分。MMC 主电路结构高度模块化, 含有大量的子模块, 且相互之间级联。文献[11-12]指出, 通过调节子模块的级联个数可以完成不同等级

的功率输出和电压输出^[13], 并且抗电磁干扰能力强, 减少输出电压的谐波含量, 所以 MMC 的灵活性更高、扩展性也更强。

MMC 的这些结构特点对其控制系统的信号采集、脉冲发生和数据处理能力提出了比较高的要求, 而且为满足系统隔离和复杂电磁环境需要, 一般采用光纤作为数据传输的介质。

文献[14]提出了一种控制系统结构, 该结构包括一个主控器和若干个子模块控制器, 即在每个子模块上安装一个控制器。该控制结构实现了对每个子模块快速可靠控制的目的, 具有高效的控制效率, 并满足 MMC 的模块化设计和各个子模块间的隔离性。

目前, 对 MMC 相关技术的研究, 主要包括数学模型、元件参数选择、电容电压平衡和调制策略等方面^[15-21]。其中, 子模块电容电压平衡控制是

MMC 应用的关键技术之一。而实现子模块电容电压平衡控制, 均需子模块控制器完成电压数据参数的采集、处理、传输和子模块故障信息的反馈以及控制子模块的投切。

为实现对子模块电容电压的精确采集, 达到电容电压平衡控制, 实现 MMC 系统的多电平输出, 按照文献[14]提出的控制系统结构, 本文设计了该控制系统中的子模块控制器, 从硬件和软件方面对子模块控制器进行介绍。通过实验验证所设计的子模块控制器的合理性。

1 MMC 控制系统总体结构和工作原理

整个 MMC 控制系统主要包括三大部分, 即主控制器、子模块控制器和数据采集部分。主控制器包括 CPU 模块、电源模块、光纤模块等。其中, CPU 模块主要包括主控制器 L137 和辅助控制器 FPGA 等。子模块控制器包括数据处理模块、子模块电容电压采集模块、光纤模块和电源系统及驱动模块等。数据采集模块主要采集三相电压、三相电流以及三相上下桥臂电流。如图 1 所示。

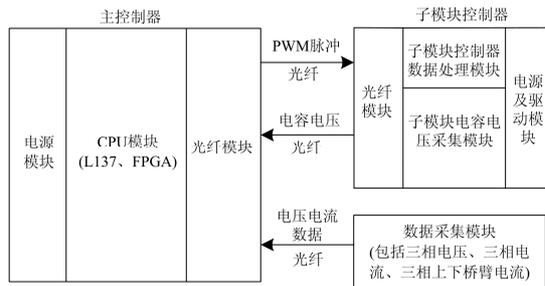


图 1 MMC 控制系统总体结构

Fig. 1 Overall structure of MMC control system

MMC 控制系统包含一个主控制器以及若干个子模块控制器、多个数据采集模块, 每个子模块控制器和数据采集模块与主控制模块之间使用光纤进行通信。主控制器的核心部分主要有辅助控制芯片 FPGA 和主控制芯片 L137。辅助控制芯片 FPGA 一方面接收子模块控制器和数据采集模块传来的电流电压数据, 存储到 FPGA 内部的 FIFO 缓存器中, 再进行数据串/并换, 再将并行数据传给 L137 进行计算处理。另一方面, 辅助控制芯片 FPGA 接收 L137 反馈的计算结果, 并根据计算结果产生 PWM 波, 通过光纤传给子模块控制器。L137 包括 DSP 和 ARM。DSP 负责处理 FPGA 传来的数据, 并将处理结果分别传给 FPGA 和 ARM。ARM 的功能有 2 个: 一是接收 DSP 处理的结果, 并将数据传给上位机, 在上位机上以图形的方式显示此处理结果,

便于研发人员观察 DSP 处理结果。二是接收通过上位机加载的 DSP 和 FPGA 的程序, 控制 DSP 的计算, 方便通过网线进行远程调试程序。子模块控制器主要完成子模块电容电压的采集, 并将其传送至主控制器, 同时接收主控制器发送过来的 PWM 脉冲, 生成双路 PWM 脉冲驱动子模块上的两个 IGBT, 进而实现子模块的投切。数据采集模块采集三相电压, 三相电流和三相上下桥臂电流, 并将该电流电压数据及时传送至主控制器。

2 子模块控制器的硬件设计

2.1 子模块控制器的工作原理

图 2 为子模块控制器在 MMC 控制系统中的硬件框图。子控制器所用的控制芯片为 FPGA。子控制芯片 FPGA 主要是控制子模块电容电压采集模块的 A/D 转换器采样及接收 A/D 转换器的采样数据、生成两路 PWM 脉冲、通过光纤模块实现与 CPU 核心板之间的通信。一方面 FPGA 控制子控模块电容电压采集模块的 A/D 转换器的采样, 与此同时接收 A/D 采集的数据, 然后经过 FPGA 内部 FIFO 存储器进行缓存, 再进行并/串转换, 经光纤通信模块发送给主控制器的 CPU 模块。CPU 模块的辅助控制器 FPGA 将接收的电流电压数据进行串/并变换, 再将数据传送至 L137。L137 将计算结果及时反馈给辅助控制器 FPGA, 并根据结果选择投入满足条件的子模块且通过光纤向对应的子控制模块发送调制波。另一方面 FPGA 通过光纤通信模块接收 CPU 模块发送的调制波, 与自身设定的三角载波进行比较产生互补的两路 PWM 信号, 再经过死区保护, 最终形成驱动信号, 进而通过驱动模块, 实现子模块单元电容电压平衡。

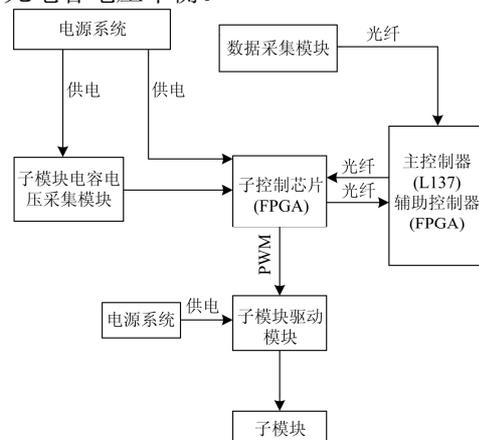


图 2 子模块控制器在 MMC 控制系统中的硬件框图

Fig. 2 Sub-module controller for the hardware block diagram in MMC control system

2.2 子模块控制器数据处理模块

子模块控制器数据处理模块主要是由子控芯片 (FPGA)、JTAG 接口、电源系统、时钟电路、外部接口和一些外围阻容电路组成。使用的 FPGA 的型号是 Altera 公司的 EP1C3T100I7。该芯片优势在于引脚较少, 功能强大且成本较低。通过 JTAG 接口将对应的软件程序烧录到 FPGA, 主要用于 FPGA 芯片内部测试以及对整个系统的仿真和调试。电源系统主要是由两个正向低压降稳压器 AMS1117-3.3 和 AMS1117-1.5 组成, 使得电源系统产生 3.3 V 和 1.5 V 输出电平, 保证整个核心模块的正常工作。时钟电路的功能是向子模块控制器提供工作频率, 电路结构主要包括有源晶振。外部接口是子控制器核心模块与其他模块间进行数据的通信, 主要有接收来自子模块电容电压采集模块电压数据、经由光纤通信模块向主控制器发送的串行数据、接收经由光纤通信模块来自于主控制器的 PWM 信号、向子模块驱动模块发送的双路 PWM 信号等。

2.3 子模块电容电压采集模块

子模块电容电压采集模块主要是由电压传感器、电容电压检测电路以及 A/D 转换电路组成。如图 3 和图 4 所示。

采用 LEM 电压传感器, 传感器型号 LV25-P, 可以准确地采集子模块电容电压, 范围为 0~600 V。电压检测电路由线性降压电路、线性光耦电压检测电路以及电流/电压转换电路组成。线性降压电路由若干个阻容元件组成, 该电路可以将 0~600 V 的高电

压线性减小到 0~10 V 的弱电压信号。转换后的弱电信号经线性光耦电压检测电路进行电气隔离。光隔离是一种常见的信号隔离形式, 线性光耦电压检测电路主要由线性光耦 HCNR201、运算放大器 CA3140 和阻容元件组成。电流/电压转换电路主要是由运算放大器 CA3140 和一些阻容元件组成。由于线性光耦检测电路输出端是电流信号, 电流信号通过电流/电压转换电路转换成电压信号。经由电压检测电路, 采集的电压范围为 0~2.5 V, 并被传送至 A/D 转换器。A/D 转换芯片采用 AD7472, 是 12 位低功耗逐次逼近型、高速 ADC, 其工作电压为 2.7 V 至 5.25 V 单电源, AD7472 的最高吞吐量可达 1.5 MBPS, AD7472 内置一个宽带宽采样/保持、低噪声放大器, 可处理 20 MHz 以上的输入频率。AD7472 输出的 12 位数字量将被传送至 FPGA。

2.4 光纤通信模块

光纤通信模块是将子模块控制器的数据处理模块传来的电信号转化成光信号, 送给主控制器的 CPU 模块处理计算以及接收经由光纤传送的 CPU 模块产生的调制信号, 并将该光信号转化成电信号, 传送至子模块控制器数据处理模块。光纤通信模块包括两大部分电路, 一个是发送端口电路(如图 5 所示), 一个是接收端口电路(如图 6 所示)。发送端口电路将数据处理模块传来的数据 OTX, 以光形式发送出去。接收端口电路接收主控制器发送的光信号, 并将该光信号转化成电信号 ORX 传送至子模块控制器的核心模块进行处理。

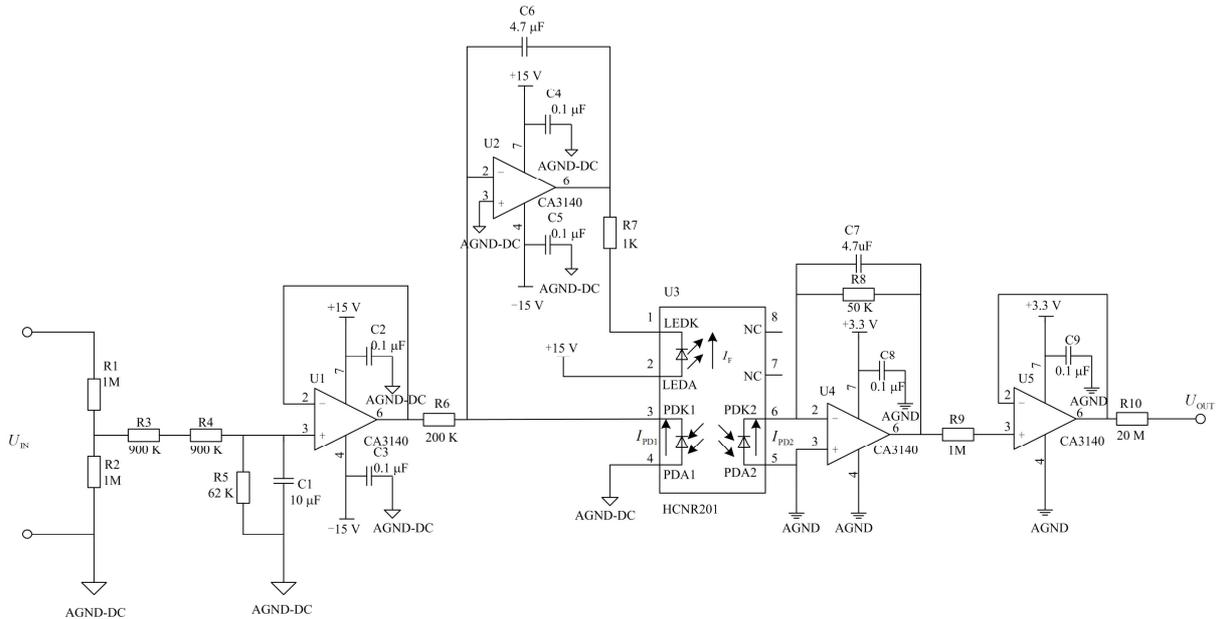


图 3 子模块电容电压检测电路

Fig. 3 Sub-module capacitance voltage detection circuit

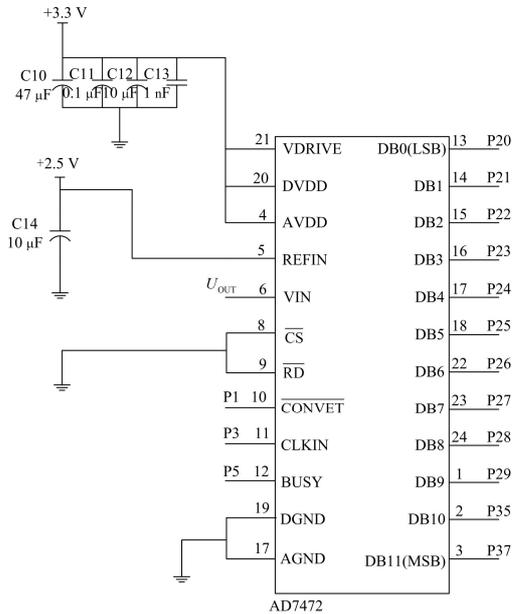


图 4 A/D 转换电路

Fig. 4 A/D conversion circuit

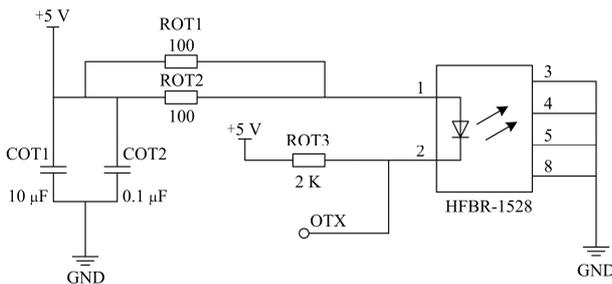


图 5 光纤模块的发送端口电路

Fig. 5 Sending port circuit of fiber module

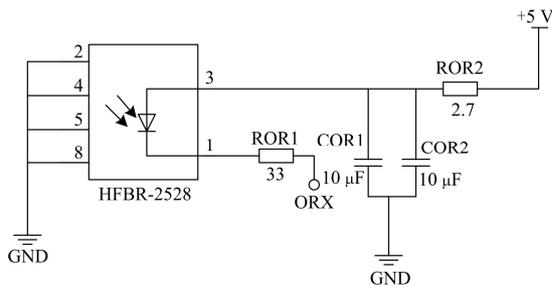


图 6 光纤模块的接收端口电路

Fig. 6 Receiving port circuit of fiber module

2.5 电源模块

电源模块给整个子模块控制器的各个模块供电, 保证子模块控制器的正常工作。电源模块的输入为通过单向全桥整流进来的直流电压, 约为 220 V 左右。输出有 4 路, 分别是给两路 IGBT 驱动电路供电 +17V1、-5V1 以及 +17V2、-5V2, 给核心模块供电的 +5 V 以及给电容电压采集模块供电的正负 15 V。

2.6 驱动模块

驱动模块接收数据处理模块 FPGA 发送来的两路 PWM 信号和保护信号以及复位信号, 进而驱动两个 IGBT, 实现子模块单元的投入与切除。FPGA 控制 IGBT 驱动模块电路如图 7 所示。

驱动模块主要由两个光耦合器 HCPL-316J 芯片和外围电路构成。每一个光耦合器 HCPL-316J 芯片都由管脚作为控制信号, 管脚 V_{in+} 全部接 +5 V 电源, 正常工作时, HCPL-316J 芯片 V_{in-} 端与 V_{out} 端保持同步同相, 且响应时间小于 500 ns。工作原理是: 当 V_{out} 端输出高电平时, $U_{GE} \geq 15 V$, IGBT 开通; 当 V_{out} 端输出低电平时, $U_{GE} \leq -5 V$, IGBT 关断。

欠压和过流保护: 光耦合器 HCPL-316J 所内置的 IGBT 检测和保护功能, 使得驱动电路的设计更加地简便、安全。当 U_{ce2} 低于 13 V 时, 激活光耦合器 HCPL-316J 中欠压锁定保护和短路电流保护 (DESAT), 使驱动模块的输出一直保持在低电位, 封锁 IGBT, 以免在过低的栅极和射极间电压下 IGBT 在导通时发生过流, 损坏器件。由于 IGBT 自身所拥有的特性, U_{CE} 急剧升高, 快恢复二极管 D_1 和 D_3 检测 U_{CE} 的值, 如果超过已设定的 U_{CE} 保护电压, 那么 DESAT 端的电压大于 7 V, 退饱和和保护电路被激活, 光耦合器 HCPL-316J 保持低电平输出, 关断 IGBT, 同时 \overline{FAULT} 端输出低电平, 向 FPGA 反馈该故障信息。

3 子模块控制器的软件设计

子模块控制器的软件设计主要包括两大部分, 即数据通信部分和 PWM 驱动脉冲分配部分。

3.1 数据通信部分的软件设计

数据通信部分是完成电容电压数据信息、子模块保护信息的上传, 接收主控制器通过光纤传送来的 PWM 调制波信号。具体地, 子模块控制器采集到的子模块电容电压需要上传给主控制器, 通过光纤作为传输介质, 为了保证主控制器能够准确地接收数据, 子模块控制器的数据通信部分需要按照一定规则对所传输的数据进行封装处理, 如此, 作为接收端的主控制器也按照此规则进行解封处理, 从而还原出数据。同理对于子模块的保护信息的上传也是如此, 数据通信部分将子模块的故障信息进行封装处理, 从而实现可靠通信的目的。子模块控制器和主控制器间通过同步信号保证通信正常。另外, 数据通信部分同时接收主控制器反馈回来的 PWM 调制信号。图 8 是数据通信部分完成子模块电容电压上传的软件流程图。

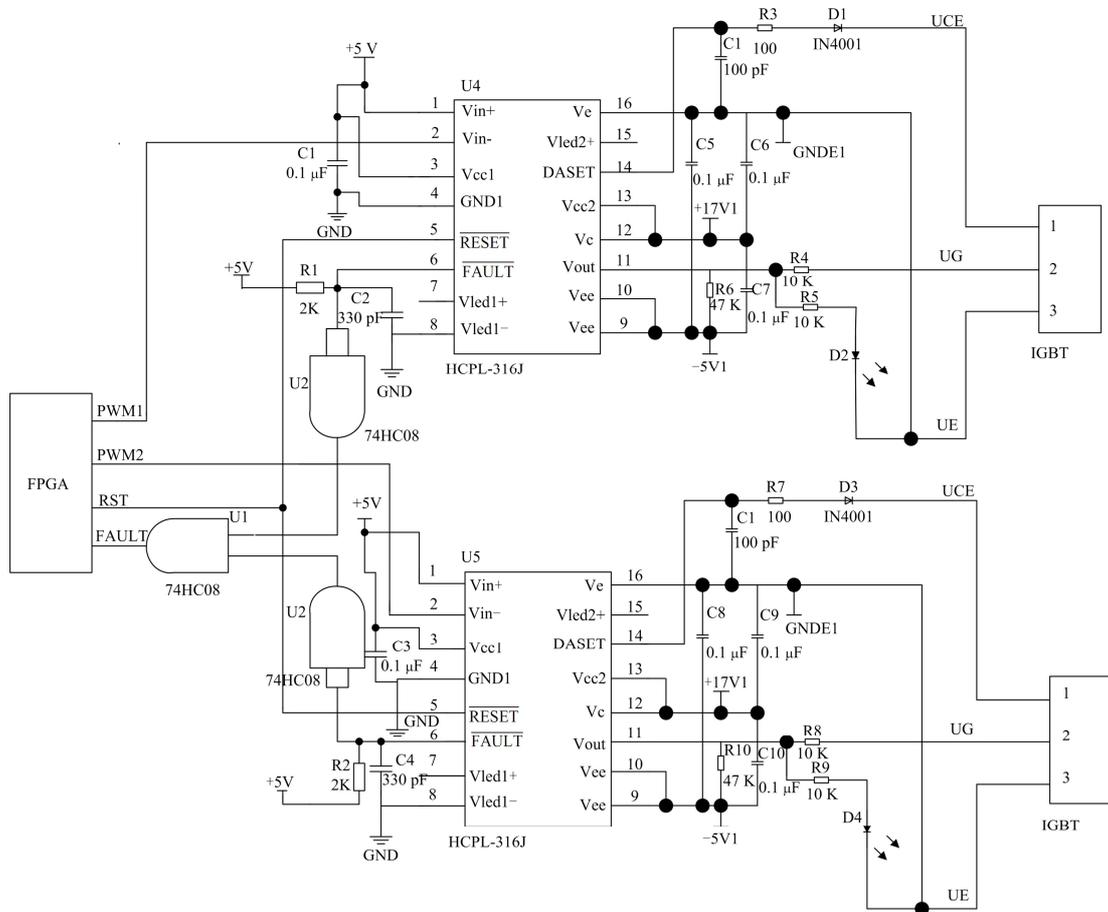


图 7 IGBT 驱动模块电路

Fig. 7 IGBT drive module circuit

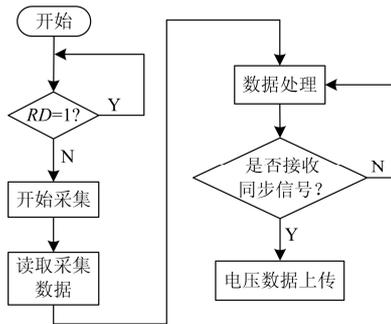


图 8 子模块电容电压上传的软件流程图

Fig. 8 Software flowchart of sub module capacitance voltage upload

3.2 PWM 驱动脉冲分配部分的软件设计

PWM 驱动脉冲分配部分是子控芯片 FPGA 的主要功能之一，该部分是将光纤传输来的 PWM 调制脉冲信号，与 FPGA 自身设置的三角波进行比较，生成两路互补的 PWM 信号，再经过死区保护，从而生成驱动脉冲。图 9 为 PWM 驱动脉冲分配部分的程序流程图。

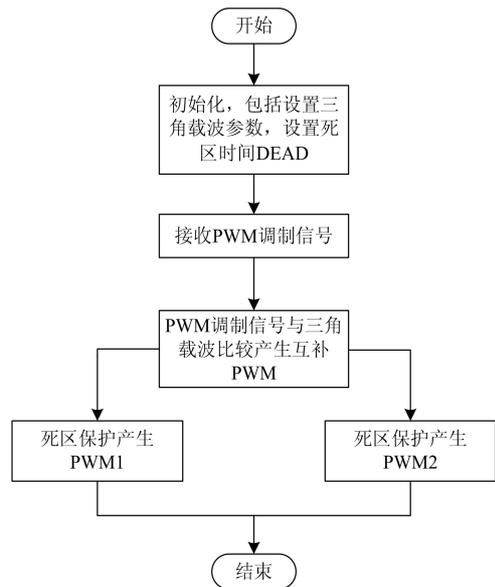


图 9 PWM 驱动脉冲分配部分的程序流程图

Fig. 9 Software flowchart of PWM driving pulse distribution part

在此需要说明的是, 由于 IGBT 存在一定的结电容, 该结电容会造成 IGBT 导通关断的延迟现象。故为了使 IGBT 上下管不会因为延迟现象而发生同时导通, 需要对生成的两路互补的 PWM 信号进行死区保护, 设置一个保护时段。本文通过软件的方式完成带死区保护的两路互补的 PWM 驱动脉冲, 死区保护具体软件实现如下:

```
ENTITY DEAD_PWM IS
PORT(CLK,PWMIN1,PWMIN2:IN STD_LOGIC;
DEADTIME:IN STD_LOGIC_VECTOR(7 DO
WNT0 0);
PWMOUT1,PWMOUT2:OUT STD_LOGIC);
END DEAD_PWM;
ARCHITECTURE BEHAVE OF DEAD_PWM IS
SIGNAL Q:STD_LOGIC_VECTOR(7 DOWNT0 0);
BEGIN
PROCESS(CLK)
BEGIN
IF(CLK'EVENT AND CLK='1') THEN
IF((PWMIN1='1') AND (Q=DEADTIME))
THEN Q<=Q+1;
ELSIF((PWMIN2='1') AND (Q="00000000"))
THEN Q<=Q-1;
END IF;
IF((PWMIN1='1') AND (Q=DEADTIME))
THEN PWMOUT1<='1';
ELSE PWMOUT1<='0';
END IF;
IF((PWMIN2='1') AND (Q="00000000"))
THEN PWMOUT2<='1';
ELSE PWMOUT2<='0';
END IF;
END IF;
END PROCESS;
END BEHAVE;
```

4 实验

设计完成的子模块控制器实物如图 10 所示。



图 10 子模块控制器实物

Fig. 10 Sub-module controller object

左侧的实物图有上下两层板, 上层板为子模块

控制器数据处理模块, 下层板为光纤通信模块和子模块电容电压采集模块。右侧的实物图为电源模块和子模块驱动模块。基于以上所设计的子控制器实物, 搭建实验平台。

先测试所设计的 MMC 子模块控制器各项输出信号是否正常, 即写 VHDL 程序于 FPGA 中, 要求 FPGA 输出为占空比 50% 的高低电平信号, 后经过子模块控制器内部电平转换芯片变为 TTL 信号, 后输入驱动模块得到驱动 IGBT 信号, 用示波器监测各节点, 如图 11 所示。

1 号通道是 FPGA 输出 IGBT 信号(0~3.3 V), 2 号通道是经电平转换芯片后输出 TTL 信号(约 0~5V), 3 通道是驱动模块输出的驱动信号(约 -16 V~+16 V), 基于上述, 所设计的 MMC 子模块控制器的输出信号可以完成 IGBT 的导通与闭合。

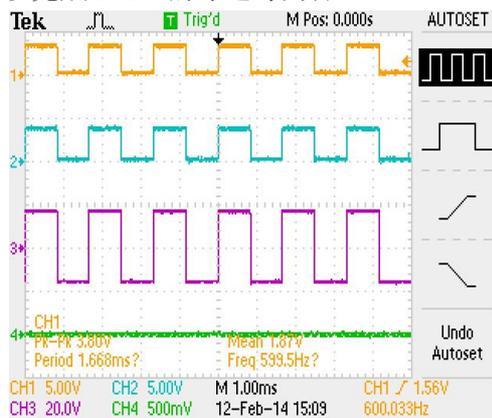


图 11 子模块控制器各重要节点信号输出

Fig. 11 Signal output of each important node of the sub-module controller

所搭建的实验平台为单相的两个子模块组成的单相 DC-AC 变换器, 其结构为上下桥臂各一个子模块, 以此实现两电平输出。实现方案是 DC-AC 变换器上下桥臂各一个子模块, 每个子模块由一个子模块控制器对其进行子模块电容电压的采集, 子模块控制器再将电压数据通过光纤传送到主控制器。上下桥臂还各有一个数据采集板, 采集桥臂电流并通过光纤发送至主控制器。主控制器完成控制算法选择需要投入和切除子模块, 实现 DC-AC 电压变换。输入端 U_{DC} 加上 10 V 直流电压, 用示波器测试上桥臂子模块电容两端的电压变化情况, 继而验证所设计的子模块控制器的可行性和合理性。

实验测得结果如图 12 所示, 所搭建的 DC-AC 变换器实验平台实现了两电平输出, 子模块控制器控制子模块的投入与切除, 子模块投入时, 其电容两端电压为 10 V; 子模块切除时, 电容进行放电。所设计的子模块控制器达到预定要求。

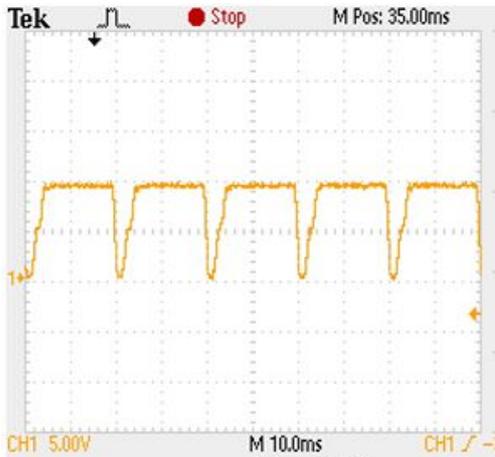


图 12 DC-AC 实验平台上桥臂子模块电容两端电压变化波形
 Fig. 12 Sub-module capacitance voltage waveform change on the upper bridge arm in DC-AC experimental platform

5 结语

本文从 MMC 的实际需求出发,为满足在 MMC 实际应用中的需要,设计了 MMC 控制系统的子模块控制器。为能够有效地、准确地采集子模块功率单元中的电容电压和监测功率单元的运行状态,且能够快速地与主控制器间进行数据传输,在硬件和软件两个方面设计子模块控制器。用示波器监测各重要节点输出信号,在单相的两个子模块组成的 DC-AC 变换器实验平台实现了两电平输出,示波器监测子模块功率单元电容电压在投入与切除间的变化情况,验证了所设计的子模块控制器的可行性和合理性。

参考文献

[1] 代高富, 赵丹, 林鹏峰, 等. 基于 MMC 拓扑的有源滤波器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 75-80.
 DAI Gaofu, ZHAO Dan, LIN Pengfeng, et al. Study of control strategy for active power filter based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 75-80.

[2] 李善颖, 吴涛, 任彬, 等. 基于模块化多电平变换器的储能系统综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 139-146.
 LI Shanying, WU Tao, REN Bin, et al. Review of energy strategy system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 139-146.

[3] 张浩, 吴金龙, 杨美娟, 等. 模块化多电平变换器新型桥臂环流抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,

2015, 43(21): 73-80.
 ZHANG Hao, WU Jinlong, YANG Meijuan, et al. A novel bridge arm circulating current restraint strategy for modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 73-80.

[4] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C] // Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE, Bologna, Italy, 2003, 3: 6 pp.

[5] 陈耀军, 陈柏超, 袁佳歆, 等. 模块化多电平逆变器电容电压及环流控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 166-174.
 CHEN Yaojun, CHEN Bochao, YUAN Jiaxin, et al. The control of capacitor voltages and circulating current of the modular multilevel inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 166-174.

[6] 朱玲, 符晓巍, 胡晓波, 等. 模块化多电平变流器 HVDC 系统的模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 1-8.
 ZHU Ling, FU Xiaowei, HU Xiaobo, et al. Model predictive control of modular multilevel converter for HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 1-8.

[7] 管敏渊, 徐政. 向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模与控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 255-263.
 GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 255-263.

[8] 张哲任, 徐政, 薛英林. MMC-HVDC 系统过电压保护和绝缘配合的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 58-64.
 ZHANG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin. Study of overvoltage protection and insulation coordination for MMC based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 58-64.

[9] 胡鹏飞, 江道灼, 郭捷, 等. 基于混合型多电平换流器的柔性直流输电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 33-38.
 HU Pengfei, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. VSC-HVDC system based on hybrid multilevel voltage sourced converters[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 33-38.

[10] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报,

- 2013, 33(26): 27-33.
- YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large scale PV grid-connected system based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(26): 27-33.
- [11] 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.
- [12] 任涛, 张杰, 唐剑钊, 等. MMC-HVDC模块电容器预充电策略及仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 144-148.
- REN Tao, ZHANG Jie, TANG Jianzhao, et al. MMC-HVDC charging strategy research and simulation analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5): 144-148.
- [13] 张建波, 赵成勇, 孙海峰, 等. 模块化多电平换流器改进拓扑结构及其应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 173-179.
- ZHANG Jianbo, ZHAO Chengyong, SUN Haifeng, et al. Improved topology of modular multilevel converter and application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 173-179.
- [14] GINKA M. Prototype of multiphase modular multilevel converter with 2 MW power rating and 17-level-output-voltage[C]// Proceeding of IEEE PESC, 2004: 2572-2576.
- [15] 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.
- GUANG Minyuan, XU Zheng. Optimized capacitor voltage balancing control for modular multilevel converter based VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 9-14.
- [16] QIN J C, SAEEDIFARD M. Reduced switching-frequency voltage-balancing strategies for modular multilevel HVDC converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2903-2912.
- [17] HAGIWARA M, AKAGI H. Control and experiment of pulse width-modulated modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7): 1737-1746.
- [18] DENG Fujin, CHEN Zhen. A control method for voltage balancing in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 66-76.
- [19] 蔡新红, 赵成勇, 庞辉, 等. 基于 MMC 离散数学模型的 MMC-HVDC 系统直流电压控制[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2403-2409.
- CAI Xinhong, ZHAO Chengyong, PANG Hui, et al. A novel DC voltage control of MMC-HVDC power transmission system based on discrete mathematical model of MMC[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2403-2409.
- [20] 郑博文, 武守远, 戴朝波, 等. 模块化多电平换流器分析桥臂电流控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1726-1731.
- ZHENG Bowen, WU Shouyuan, DAI Chaobo, et al. An individual bridge-arm current control strategy for modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1726-1731.
- [21] GNANARATHNA U N, GOLE A M, JAYASINGHE R P. Efficient modeling of modular multilevel HVDC converters (MMC) on electromagnetic transient simulation programs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 316-324.

收稿日期: 2015-04-01; 修回日期: 2015-11-28

作者简介:

邢长达(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统控制; E-mail: 515130804@qq.com

郭家虎(1974-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力变换, 电力系统控制, 电力传动等方面研究。

(编辑 葛艳娜)