

基于 PEBB 概念的链式结构 DSTATCOM 换流模块设计

杨 昆,王 跃,陶海军,陈国柱

(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要: 为提高链式结构 DSTATCOM 的补偿性能和可靠性,基于电力电子积木(PEBB)概念设计了其“即插即用”型基本功率单元——基于 H 桥逆变器的换流模块(HCM)。介绍 HCM 的主电路主要设计选型,并针对额定容量 278 kW、电流 600 A 的 HCM 进行了结构和散热设计。为提高 HCM 工作灵活性和抗干扰能力,基于复杂可编程逻辑器件(CPLD)设计模块控制器,实现对模块控制、检测和采样,采用专用驱动核芯片设计驱动电路工作,完善保护并提高模块稳定性。介绍了用于 HCM 测试的实验平台,在 10 kV/±3 Mvar 的 DSTATCOM 工业样机上运行所设计的 HCM,验证了模块的各部分功能的运行性能和可靠性。

关键词: DSTATCOM; PEBB; HCM; 模块控制器; CPLD

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.010

0 引言

由于电弧炉、电焊机、轧钢机等大容量、冲击性无功负荷以及电力电子装置等非线性负荷的大量应用,配电网电能质量问题日益严重^[1-2]。配电网静止同步补偿器(DSTATCOM)可有效解决由于无功和谐波引起的电压跌落或上升、三相不平衡、电磁干扰、损耗和噪声等电能质量问题,并且运行性能优越,具有调节速度快、运行范围宽、输出谐波小等优点,应用前景良好,受到国内外学者的广泛关注^[3-5]。

链式结构 DSTATCOM 的基本功率单元为基于 H 桥逆变器的换流模块(HCM),结构简单,便于模块化设计。其采用低耐压开关器件和无源元件,通过 HCM 交流侧串联提高装置耐压等级,由单个器件较低的开关频率实现高等效开关频率的效果,有效减小装置损耗,降低交流滤波器容量,广泛应用于补偿要求较高的中压配电网。大量文献对基于该拓扑 DSTATCOM 的模型分析、运行特性、交/直流侧控制策略、调制方式及应用领域等展开了深入讨论,取得了丰富成果^[6-11],但少有涉及功率单元 HCM 的软硬件设计。

换流模块的可靠性、可控性和可测量性直接关系 DSTATCOM 整体的补偿性能和稳定性,并且具有高功率密度、模块化设计的 HCM 方便实现电压和容量匹配,增强装置补偿性能和灵活性,是 DSTATCOM 的核心组件。本文基于 PEBB 概念,以模块化、控制、供电和检测分散智能化,以及可靠性为目的,介绍了一种集成功率变换、驱动控制、检测保护等功能的“即插即用”型 HCM,包括主电路原理及参数设计、

结构及散热设计;基于 CPLD 开发了具有高可靠性的通用模块控制器;搭建 HCM 实验平台,通过实验测试验证了设计的正确性,并且在一台 10 kV/±3 Mvar 工业样机上进行实验,验证了模块的可靠性。

1 HCM 主电路设计

1.1 主电路原理及电气参数

HCM 电路原理如图 1 所示,主电路包括基于 IGBT 的 H 桥逆变器、直流支撑电容 C_{dc} 、尖峰吸收电容 C_s 和直流泄放电阻 R_{dc} 。

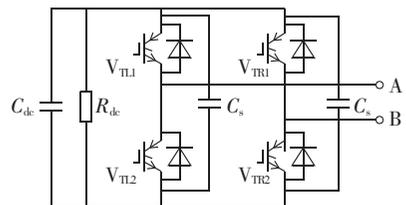


图 1 HCM 电路原理图

Fig.1 Schematic diagram of HCM

通过桥臂的开关组合可以获得不同的等效交流输出电压 U_{AB} 。IGBT 电气参数主要考虑器件耐压、电流和开关频率,模块化设计还需要考虑封装、发热和寄生参数等问题,每个桥臂($V_{T1,2}$ 、 $V_{T1,2}$)通过若干 IGBT 并联组成,以满足 HCM 功率要求^[12]; C_{dc} 容值选择主要考虑脉动电压的抑制能力,此外还需要根据仿真确定极限工况时流过的纹波电流,通常采用多个金属化膜电容并联获得较高的纹波电流吸收能力^[13];尖峰吸收电容用来抑制由于 IGBT 引线及杂散电感产生的关断尖峰,根据吸收回路能量守恒确定其参数;装置退出运行后,直流支撑电容存储的能量通过泄放电阻释放,保证操作人员安全,放电时间根据用户及行业标准确定。

1.2 结构及散热

应用 SolidWorks 软件根据上述原则,设计了额定

收稿日期:2013-07-10;修回日期:2014-05-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177147);浙江省重点科技创新团队项目(2010R50021)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177147) and Zhejiang Key Science and Technology Innovation Group Program(2010R50021)

功率 278 kW、电流 600 A 的 HCM，每个桥臂采用 3 只英飞凌公司 FF450R17ME4 型 IGBT 并联，模块 3D 效果图如图 2 所示，其电气间隙、爬电距离和载流密度等都满足国标和 IEC 标准，并且直流侧采用层叠母线以减小寄生参数影响。HCM 功率接口为交流母线的 2 个连接端子，散热为 2 个进出水快速接头，控制包括上行、下行 2 根通信光纤及电源接口，模块内部集成控制、保护及状态检测等功能，在应用时只需将交流侧端子根据电路拓扑连接，快速接头与主管路连接，通信光纤与主控制器对应连接，隔离交流 20 V 供电，即实现即插即用。在实际 DSTATCOM 运行过程中，单个模块故障拆卸及安装时间小于 5 min，充分保证了工作效率。

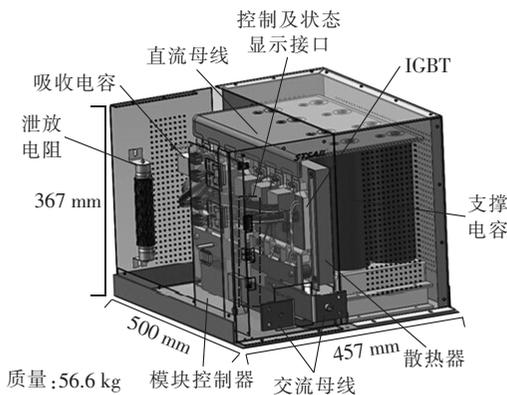


图 2 HCM 3D 效果图

Fig.2 3D impression drawing of HCM

HCM 工作温度需要满足行业 and 用户要求^[14-15]，通过仿真计算方法验证热设计，可有效减少开发成本周期。设 HCM 最高开关频率 2.5 kHz，根据仿真计算及数据手册提供热阻参数，并保留一定余量，有：模块额定工作损耗 2 kW，芯片到散热基板温差小于 25℃。为保证器件工作温度不超过 90℃ 的安全范围，采用水冷方式散热，若最高工作环境温度设计为 45℃，考虑由于器件基板和散热器连接处存在 5℃ 温差，则散热器稳定后温度应小于 60℃。根据上述条件，将 IGBT 看作恒功率源，在确定水冷板结构前提下调整水流量进行仿真，以保证散热要求，仿真结果见图 3。

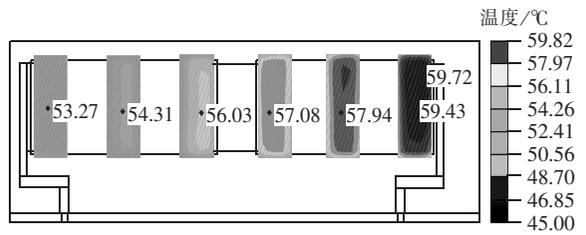


图 3 散热器仿真结果

Fig.3 Simulative results of heat sink

2 模块控制器设计

2.1 模块控制器结构

模块控制器结构见图 4，由供电、接口、驱动、检测和控制 5 个单元组成，主要实现与 DSTATCOM 系统控制器串行通信，接收控制信号及驱动 IGBT 开关工作，同时反馈模块状态。

供电单元原理如图 5 所示，供电单元为其他功能单元供电，由于电源品质和可靠性直接影响模块控制器稳定性和性能，因此采用高可靠性、稳压输出的模块电源完成，设计时要充分考虑容量和负载效应，并且与驱动电路连接的部分输出要做 EMC 处理，防止主功率回路对控制回路的反向干扰。

为保证通信速度和可靠性，采用光纤传递控制/反馈信号，接口电路实现光/电信号转换，此外模块状态指示及控制器复位也通过接口电路实现；驱动单元与功率回路直接电气连接，而 HCM 在高压大容量开关工作条件下电磁环境恶劣，为保证模块运行可靠性，采用在工程广泛使用的 CONCEPT 公司 SCALE2 系列专用驱动核设计驱动单元。除驱动功能外，驱动核还提供了必要的保护，包括上下桥臂硬件开关死区、短路保护、有源箝位实现过压保护、驱动核电源故障等^[12,16]，并将故障反馈控制单元。

检测单元包括直流电压检测和 IGBT 过温检测，基本原理如图 6 所示。图 6(a)中，直流电压检测电路通过压频转换芯片将模拟的直流电压信号 U_{dc} 转换为数字化的频率信号，再经隔离电路送入控制单元处理；图 6(b)中，过温检测电路利用 IGBT 内部负温度系数热敏电阻 (NTC) 特性，判断散热基板壳温，随

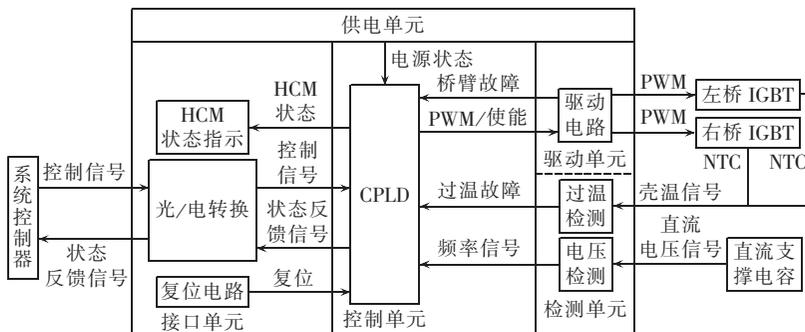


图 4 模块控制器结构

Fig.4 Block diagram of module controller

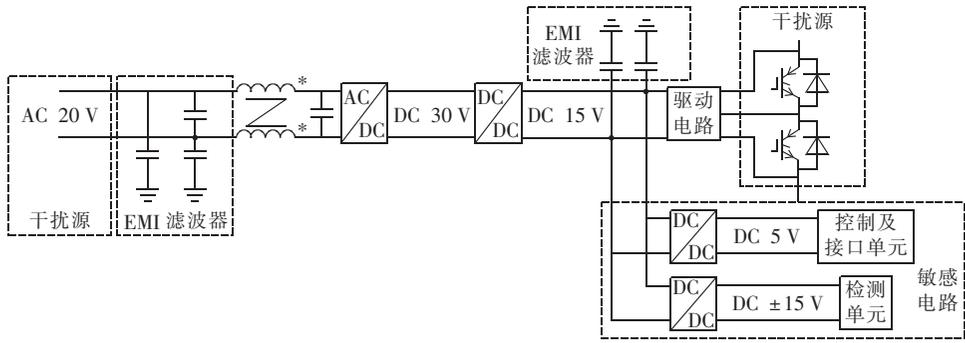


图 5 供电单元原理图

Fig.5 Schematic diagram of power unit

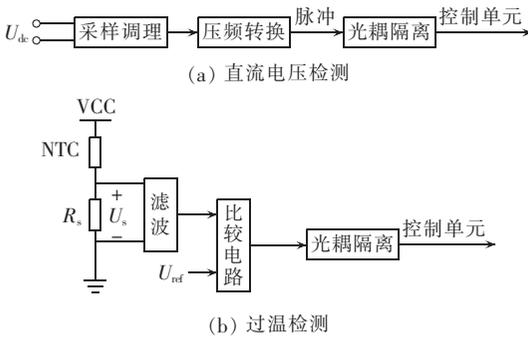


图 6 检测单元框图

Fig.6 Block diagram of detection unit

模块温度升高,NTC 阻值下降,采样电压 U_s 上升,当 U_s 大于参考电压 U_{ref} 时比较器输出电平反转,参考电压根据仿真计算的 IGBT 发热量、NTC 温度特性曲线、IGBT 最高工作结温、IGBT 芯片结到壳热阻确定。

2.2 基于 CPLD 的控制单元设计

控制单元是 HCM 工作的核心,基于 CPLD 设计,根据不同应用要求,开发相应软件,有效提高 HCM 应用灵活性和抗干扰能力。本文设计的控制单元原理如图 7 所示,包括频率计、通用移步串行通信 (UART)、状态鉴别和信号分配 4 个子模块。

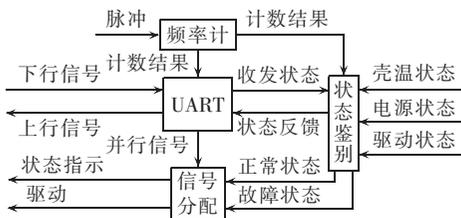


图 7 控制单元框图

Fig.7 Block diagram of control unit

频率计模块用来测量检测单元输入信号的频率,其 CPLD 实现原理见图 8。采用标准时钟脉冲对被测输入信号进行周期计数,输入信号经整形分频后转换为周期为原来 2 倍的方波信号,再分别采用 2 个高、低有效计数器,在分频信号高、低电平的半个周期内对标准时钟计数,计数器在无效状态时清零,并将计数结果储存在响应寄存器中,通过多路选

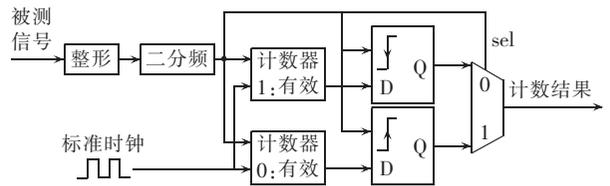


图 8 频率计实现原理

Fig.8 Schematic diagram of frequency meter

择器保证始终输出最近更新的计数结果,选择信号 sel 由分频器输出决定。选择器输出即反映输入信号频率,可根据 $f_{dk} = f_s / n$ 计算还原,其中 f_{dk} 为被测输入信号频率, f_s 为标准时钟频率, n 为二进制计数结果。

模块控制器和系统控制器之间利用 UART 进行通信,其实现原理见图 9,包括接收器和发送器。通过有限状态机 (FSM) 控制移位寄存器和输入/输出寄存器工作时序,其中接收器中通过起始位检测器触发,发送器通过定时器触发,收发时钟由各自分频器获得。通信数据格式见图 10,每帧数据包括 1 位起始位、1 位结束位和若干数据位,闲时电平拉高,起始位为低电平,结束位为高电平。上行数据为频率计

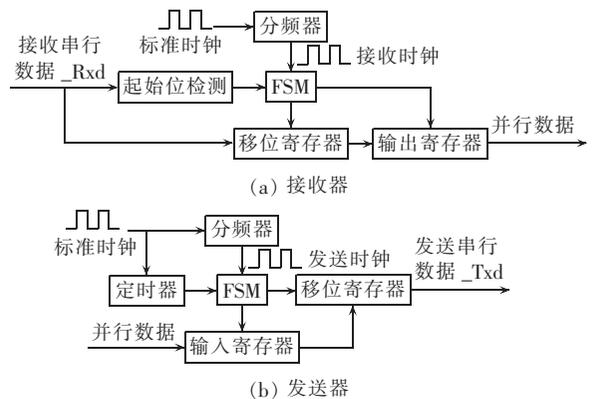


图 9 UART 实现原理

Fig.9 Schematic diagram of UART

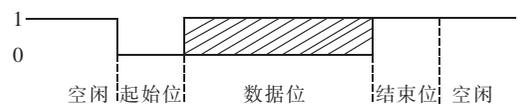


图 10 UART 数据格式

Fig.10 Data format of UART

输入周期计数值和状态鉴别模块输入的 HCM 故障,下行信号为接收主控制器的指令。具体格式定义见表 1 和表 2。其中,上行数据 100 μs /帧,每帧 18 位,位宽 400 ns;下行数据 4 μs /帧,每帧 8 位,位宽 400 ns。

状态鉴别模块检测模块通信状态,并利用频率计输入的频率信号判断电压状态,区分无压、欠压、正常和过压状态,各种状态以标志位形式指示,并送信号分配模块通过 LED 显示,紧急故障送故障处理模块处理,也可通过发送编码模块送主控制器处理。

表 1 上行数据格式定义

Tab.1 Definition of upstream data format

数据位	位定义
D17—D5	周期计数值(13 位二进制)
D4	过温标志(0-故障;1-正常)
D3	欠压标志(0-故障;1-正常)
D2	过压标志(0-故障;1-正常)
D1	右桥故障(0-正常;1-故障)
D0	左桥故障(0-正常;1-故障)

表 2 下行数据格式定义

Tab.2 Definition of downstream data format

数据位	位定义
D17—D5	保留(置高)
D4	复位信号(0-复位;1-保持)
D3	右桥 PWM(0-低;1-高)
D2	右桥使能(0-开放;1-封锁)
D1	左桥 PWM(0-低;1-高)
D0	左桥使能(0-开放;1-封锁)

3 HCM 实验平台及测试

为方便验证 HCM 各部分功能及性能,搭建 HCM 实验平台,并对模块控制信号和满载运行性能进行测试。实验平台基本原理见图 11,包括功率回路和控制回路。HCM 基本电气参数与主电路部分相同,此外还包括负载和直流调压电路,用电感作负载,换流模块工作在无源逆变状态。调压电路从三相电网

取电,通过调压器调整 HCM 直流侧电压,由于能量在负载和 HCM 支撑电容之间循环,电网只提供电压支撑和补偿线路,模块损耗。控制回路为本文设计的模块控制器和主控制器。主控制器由 DSP 和 CPLD 开发板以及光电转换电路构成,为提高 HCM 等效开关频率,采用单极倍频 PWM 方式,DSP 开环给定调制信号,反相前后的调制信号与三角载波比较,生成 2 路 PWM 信号控制 HCM 工作,调制信号频率和调制比决定模块输出电压基波频率和有效值;编、译码模块和 UART 模块与模块控制器采用相应机制进行通信,当 DSP 检测到故障通过封锁使能信号保护模块。

功率回路断开状态下控制电路工作,通过示波器观察关键信号波形。模块控制器收、发 1 帧数据波形如图 12 所示,图中上方为收发数据整体波形,下方为收发 1 帧数据细节波形,可以看出控制器收发数据时序满足控制要求。其中,接收帧有效数据为 01011,表示模块未复位,使能开放,两桥臂输出高;发送帧周期计数值为 1010011011,代表十进制 667,标准计数时钟频率 5 MHz,则可知直流电压为 0 V 时对应的频率为 7.5 kHz。状态标志为 10100,表示模块欠压故障,其他状态正常。

左桥臂上下管门极驱动信号波形如图 13 所示,其中 IGBT 开关频率设为 1 kHz,可以看出门极驱动信号开通延时 0.6 μs ,关断延时 1 μs ,有效死区时间 3.5 μs ,关断时门极电压箝位在 -10 V 可以减小高频噪声影响,保证可靠关断。

通过调压器将 HCM 直流侧电压稳定在额定 800 V,控制调制信号调制比,使交流侧输出工频额定电流 600 A,实验波形如图 14 所示。由于 IGBT 管压降要绝对控制在数据手册提供的极限值内,因此也给出器件关断时管压降波形。可以看出额定工作时,HCM 直流侧存在频率 100 Hz 的 ± 100 V 脉动,该

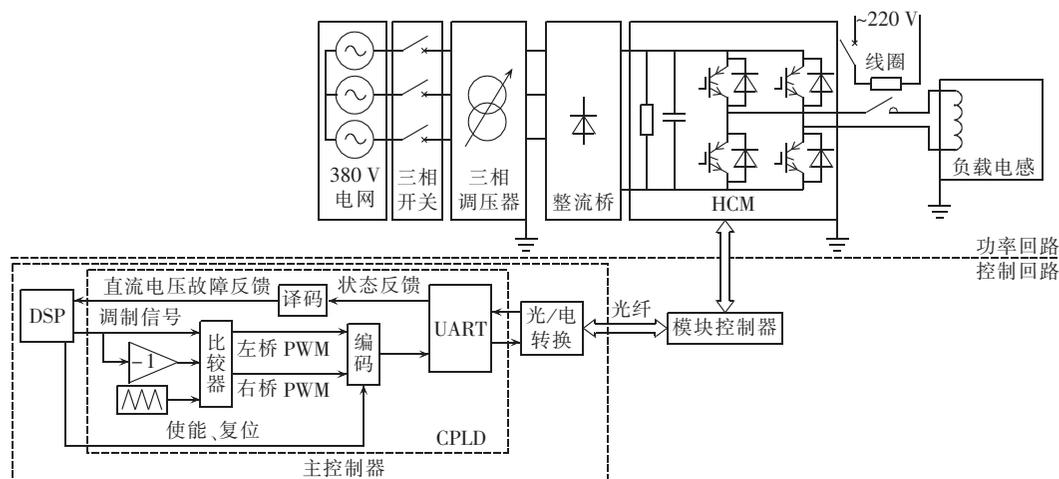


图 11 实验平台原理图

Fig.11 Schematic diagram of experimental platform

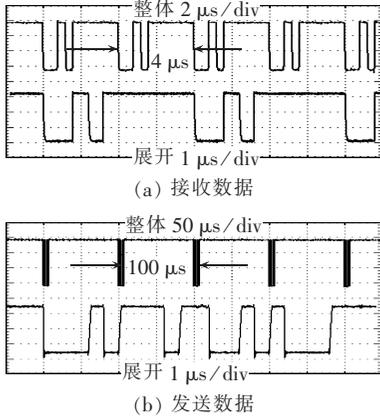


图 12 模块控制器收发数据波形

Fig.12 Data sending and receiving waveforms of module controller

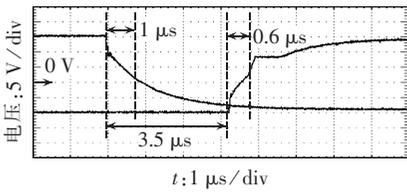
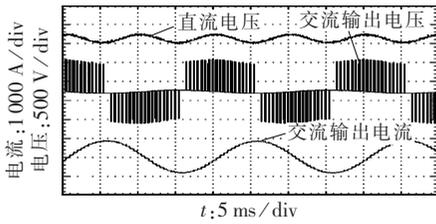
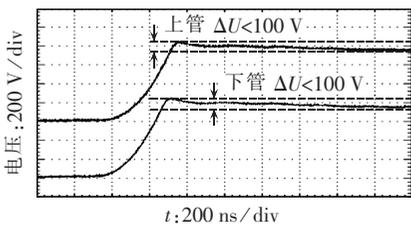


图 13 IGBT 门极信号波形

Fig.13 Gate signal waveforms of IGBT



(a) 交、直流侧波形



(b) 左桥臂上、下管关断尖峰

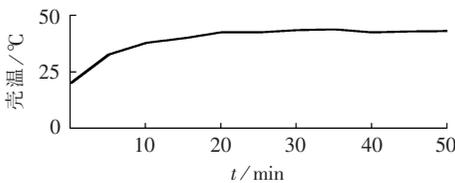
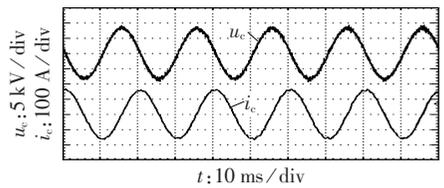


图 14 HCM 满载实验波形

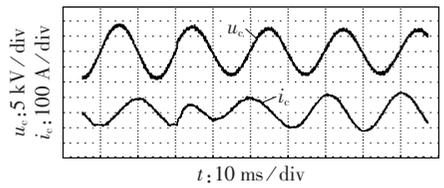
Fig.14 Experimental waveforms of HCM with full load

波动也反映到交流侧,输出电流满足要求;层叠平面母线和吸收电容将 IGBT 最大关断尖峰抑制在 100 V 以内,最大管压降小于 1000 V,满足器件安全工作要求。此外图中还给出 HCM 从开始运行到温度稳定时间内的温升曲线,可以看出最高温度满足安全运行要求。模块连续运行 12 h,各部分功能正常。

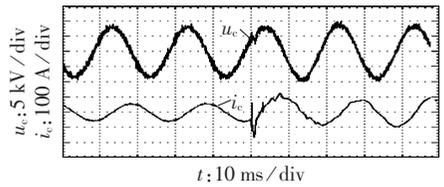
为了进一步验证 HCM 的运行性能,将其应用到在一台 10 kV/±3 Mvar 的 DSTATCOM 工业样机上进行测试,样机每相由 11 个 HCM 串联构成,总共应用模块 33 个。图 15 给出了样机实际工作波形, u_c 、 i_c 分别为一相输出电压和输出电流,其中图 15(a)为样机输出 2 Mvar 容性无功时的稳态实验波形,样机连续 6 h 运行 HCM 无异常,稳态及拷机实验结果验证了模块的可靠性;图 15(b)为样机工作在负载补偿模式下,负载容量从容性 1.5 Mvar 突变到感性 1.5 Mvar 时,样机动态实验波形;图 15(c)为样机工作在公共接入点稳压模式下,母线电压从 9.5 kV 突变到 10.5 kV 时,样机动态实验波形。实验结果验证了模块在不同工况和负载条件下的适应性和稳定性。



(a) 2 Mvar 容性无功稳态波形



(b) 1.5 Mvar 容性-感性无功突变波形



(c) 电网电压突变波形

图 15 样机实验波形

Fig.15 Experimental waveforms of prototype

4 结论

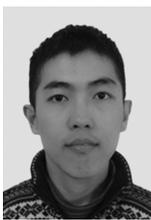
本文基于 PEBB 概念设计了应用于链式结构 DSTATCOM 集成功率变换、驱动控制、检测保护等功能的“即插即用”型 HCM,模块设计了基于 IGBT 并联的 HCM 主电路和结构,采用 CPLD 和专用驱动核芯片设计模块控制器,并介绍了模块实验平台,在实验平台测试模块各部分功能和可靠性。控制信号测试和满功率运行实验、模块连续运行实验验证了设计的正确性和模块性能。应用本文设计的 HCM,在 10 kV/±3 Mvar 的 DSTATCOM 工业样机实验验证了模块的可靠性和适应性。

参考文献:

[1] 杨昆,陈国柱. 基于重复控制的 DSTATCOM 补偿电流控制[J]. 电力系统自动化,2013,37(10):80-85.

- YANG Kun, CHEN Guozhu. Compensation current control for DSTATCOM based on repetitive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 80-85.
- [2] 刘小河, 赵刚, 于娟娟. 电弧炉非线性特性对供电网影响的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 30-34.
- LIU Xiaohu, ZHAO Gang, YU Juanjuan. Simulations on the impact in power supply network caused by the nonlinear characteristics of electric arc furnace system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 30-34.
- [3] 袁佳歆, 陈柏超, 万黎, 等. 利用配电网静止无功补偿器改善配电网电能质量的方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 81-84.
- YUAN Jiaxin, CHEN Baichao, WAN Li, et al. The method to improve power quality of distribution system by distribution static compensator[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 81-84.
- [4] 杨昆, 陈磊, 陈国柱. 单相 SVG 高性能补偿电流控制技术[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2013, 47(2): 339-344.
- YANG Kun, CHEN Lei, CHEN Guozhu. High performance compensation current control strategy of single-phase SVG[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2013, 47(2): 339-344.
- [5] YANG Kun, CHEN Lei, JIA Yuhong, et al. Study on proportional resonant control strategy of single-phase SVG[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Hangzhou, China: IEEE, 2012: 545-549.
- [6] 李建林, 王立乔, 李彩霞, 等. 基于现场可编程门阵列的多路 PWM 波形发生器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 55-59.
- LI Jianlin, WANG Liqiao, LI Caixia, et al. Multi-PWM pulse generator based FPGA[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 55-59.
- [7] 李建林. 载波相移级联 H 桥型多电平变流器及其在有源电力滤波器中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- LI Jianlin. Cascaded H-bridge multilevel converter with carrier phase-shifted SPWM technique and its application to active power filter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [8] 杨昆, 陈磊, 陈国柱. DSTATCOM 补偿不平衡负载分序控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 36-41.
- YANG Kun, CHEN Lei, CHEN Guozhu. Individual sequence control of DSTATCOM compensation for unbalanced load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 36-41.
- [9] YANG Kun, CHENG Xiaoxiao, WANG Yue, et al. PCC voltage stabilization by D-STATCOM with direct grid voltage control strategy[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Hangzhou, China: IEEE, 2012: 442-446.
- [10] 刘骥, 徐在德, 高岩涛, 等. 单电流检测配网静止同步补偿器的改进控制策略[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 60-64.
- LIU Ji, XU Zaide, GAO Yantao, et al. Improved compensation scheme of DSTATCOM based on single current control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 60-64.
- [11] 马春明, 解大, 余志文, 等. SVG 的电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 96-99.
- MA Chunming, XIE Da, YU Zhiwen, et al. Voltage control strategy of SVG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 96-99.
- [12] Intelligent Power Electronics. PACS-L: CT-concept technologie AG. application with SCALE-2 gate driver cores [EB/OL]. [2013-03-25]. <http://www.IGBT-Driver.com>.
- [13] LIANG Yiqiao, NWANKPA C O. A new type of STATCOM based on cascading voltage-source inverters with phase-shifted unipolar SPWM[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(5): 1118-1123.
- [14] 中华人民共和国航天工业部. QJ1474—88 电子设备热设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [15] 国家电网公司. Q/GDW241—2008 链式静止同步补偿器[S]. 北京: 国家电网公司办公厅, 2008.
- [16] Intelligent Power Electronics. PACS-L: CT-concept technologie AG. 2SC0650P description & application manual [EB/OL]. [2013-03-25]. <http://www.IGBT-Driver.com>.

作者简介:



杨昆

杨昆(1987-),男,河北石家庄人,博士研究生,主要研究方向为大功率级联多电平 DSTATCOM 及电能质量控制技术(E-mail: yangk1022@163.com);

王跃(1989-),男,安徽巢湖人,博士研究生,主要研究方向为无功补偿及其数字控制技术;

陶海军(1990-),男,四川内江人,硕士研究生,主要研究方向为无功补偿及有源电能质量控制技术;

陈国柱(1967-),男,湖北鄂州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为大功率电力电子装置及其数字控制、有源电能质量控制技术及可再生能源发电并网技术(E-mail: gzchen@zju.edu)。

Design of converter module based on PEBB for cascaded multilevel DSTATCOM

YANG Kun, WANG Yue, TAO Haijun, CHEN Guozhu

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to improve the compensation performance and reliability of cascaded multilevel DSTATCOM, a plug-and-play HCM (H-bridge based Converter Module) as the basic power unit is designed based on the concept of PEBB (Power Electronics Building Blocks). The type selection for the key devices in its main circuit is introduced and its structure and heat sink are designed for rated output current of 600 A and nominal capacity of 278 kW. The module controller for the control, sampling and detection is designed based on the CPLD (Complex Programmable Logic Device) to improve its flexibility and anti-interference ability and the drive circuit is designed based on the dedicated driver chips to provide the protection and improve the stability. The experimental platform is introduced, and the performances and reliability of the designed HCM operating in a 10 kV/±3 Mvar industrial prototype of DSTATCOM are verified.

Key words: DSTATCOM; PEBB; HCM; module controller; CPLD