

# 单级 T 型三电平大容量储能转换系统设计

于彪<sup>1</sup>, 王德强<sup>2</sup>

(1. 山东管理学院 智能工程学院, 山东 济南 250357; 2. 山东  
泰开电力电子有限公司 研发部, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 储能系统能够有效解决新能源发电波动性大、稳定性差的问题, 同时也能够提高用户的电能利用率, 降低生产运营成本。在储能系统中, 其能量转换系统(PCS)承担着电力变换的重要任务, 是储能系统的核心部件。单级式 T 型三电平的拓扑结构主电路简洁, 摒弃了传统的升降压 DC/DC 电路, 能够实现双向 DC/AC 变流, 以及恒流、恒压、恒功率等多种运行模式下的充放电功能, 通过提升直流侧电池的电压将单台 PCS 的容量提升至高达 630 kW。控制系统基于 DSP 开发, 引入了 RTOS 操作系统, 使系统的可移植性和拓展性大大增强。通过仿真和实测, 单级式 T 型三电平大容量 PCS 电压利用率高、滤波器容量小、谐波含量低, 功率器件的电气应力满足系统要求, 具有较高的实用价值。

**关键词:** T 型三电平; 储能; 能量转换系统; 逆变器

**中图分类号:** TM721.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed20742

## Design of Single-stage T-type Three-level Large Capacity Power Conversion System

YU Biao<sup>1</sup>, WANG Deqiang<sup>2</sup>

(1. School of Intelligent Engineering, Shandong Management University, Jinan 250357,  
Shandong, China; 2. Research & Development Department, Shandong Taikai  
Power Electronic Co., Ltd., Taian 271000, Shandong, China)

**Abstract:** The problems of large fluctuation and poor stability of new energy power generation can be effectively solved by storage system, and at the same time, the power utilization rate can be improved while the production and operation cost can be reduced. In the energy storage system, the important task of power transformation is undertaken by the power conversion system (PCS) which is the core component. The main circuit of single-level T-type three-level topology is simple because the traditional Buck/Boost DC/DC circuit is removed. The PCS is essentially a bidirectional DC/AC converter with charge and discharge functions under various operating modes, such as constant current, constant voltage and constant power, and the capacity of a single PCS can be increased to 630 kW by increasing the voltage of the DC side battery. The control system was developed based on DSP, and the portability and scalability of the system were greatly enhanced through the introduction of RTOS. Through simulation and tests, it is found that single-stage T-type three-level PCS with large capacity has high voltage utilization rate, small filter capacity, low harmonic, and the electrical stress of power devices can meet the system requirements, which has a high practical value.

**Key words:** T-type three-level; energy storage; power conversion system(PCS); inverter

能源短缺和环境污染是全球共同面临的严峻问题, 因此近年来以风力发电和太阳能光伏发电为主的新能源得到了迅速发展。而新能源发电的波动性和难以预测性使新能源的利用率大打折扣, 在此背景下储能系统应运而生, 并受到广泛关注。储能系统在发电侧和用户侧的推广

及使用都有着举足轻重的作用。一方面在发电侧, 储能系统能够解决新能源发电的波动性大、稳定性差的问题, 可以将“弃风”、“弃光”的电能存储到电池中, 待电网用电量小时释放到电网上; 另一方面在用户侧, 高耗能企业可以通过储能系统用“谷电”对电池充电, 在用电高峰期时释

**基金项目:** 山东省高等学校青创人才引育计划

**作者简介:** 于彪(1988—), 男, 硕士, 工程师, Email: yu7biaoai@163.com

放电池的电能用于生产、运营。提高电能的利用效率,降低生产运营成本的同时,也减轻了电网的负担。

储能系统中的储能转换系统(power conversion system,PCS)是储能系统的核心组件,在系统中承担着电池充电和放电的变流任务,其实质是双向可逆的DC/AC变流器。PCS主流的设计方案有单级和双级2种,单级结构的功率单元部分仅含有双向DC/AC变流器,双级结构是在DC/AC的直流侧又增加了DC/DC的升降压转换电路。与双级式结构相比,单级式PCS有结构

简单、功率器件少、控制容易等优点,其缺点是蓄电池的额定电压必须提高<sup>[1-2]</sup>。目前储能系统中蓄电池常用的是锂电池,通过锂电池串联组成电池簇,能够提高电池的额定电压,同时也提高电池的存储容量,反而更容易使PCS实现大容量的设计。

本文设计了一款额定电压380 V AC,额定容量630 kW的储能转换系统(PCS),原理图如图1所示,系统包含了T型三电平功率单元、LCL滤波、预充电电路、EMC、防浪涌器等组件<sup>[3]</sup>。

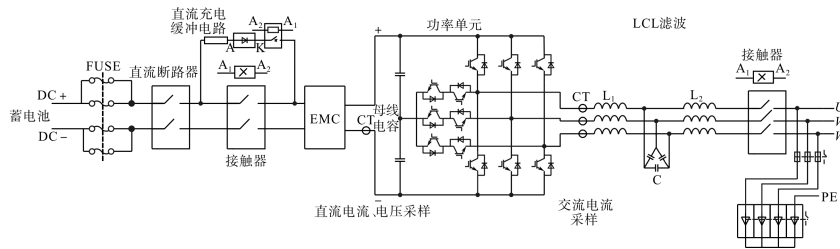


图1 储能转化系统原理图  
Fig.1 The schematic of PCS

## 1 功率单元拓扑及工作原理

### 1.1 T型三电平DC/AC变流器工作原理

PCS功率单元的拓扑本质上是双向DC/AC变流器,承担着在并网模式下蓄电池组与公共电网之间的双向电能转换,即充电模式和放电模式。功率单元的主电路拓扑采用T型三电平,主电路拓扑结构如图2所示。

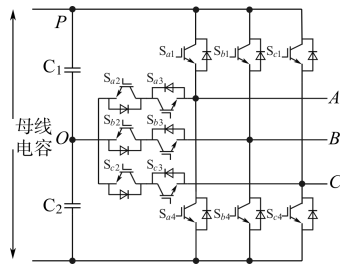


图2 T型三电平主电路拓扑结构  
Fig2 Topological structure of T-type three-level main circuit

以A相为例,当开关管 $S_{a1}, S_{a2}$ 同时导通, $S_{a3}, S_{a4}$ 同时关断时,输出端A相对于直流侧零电位参考点O点的电平为 $U_{dc}/2$ ;当开关管 $S_{a2}, S_{a3}$ 同时导通, $S_{a1}, S_{a4}$ 同时关断时,输出端A相对于O点的电平为0;当开关管 $S_{a3}, S_{a4}$ 同时导通, $S_{a1}, S_{a2}$ 同时关断时,输出端A相对于O点的电平为 $-U_{dc}/2$ 。开关管 $S_{a1}$ 与 $S_{a4}$ 不能同时导通,不考虑

死区时间时,开关管 $S_{a1}$ 和 $S_{a3}, S_{a2}$ 和 $S_{a4}$ 的驱动脉冲是互补的。开关状态不能在P和N之间直接转换,必须通过0状态来过渡。A点的相电压幅值为 $\{U_{dc}/2, 0, -U_{dc}/2\}$ 3种电平状态<sup>[4-7]</sup>,故称为三电平逆变器: $S_{a1}, S_{a2}$ 导通, $S_{a3}, S_{a4}$ 关断, $U_a = U_{dc}/2$ ;  $S_{a2}, S_{a3}$ 导通, $S_{a1}, S_{a4}$ 关断, $U_a = 0$ ;  $S_{a3}, S_{a4}$ 导通, $S_{a1}, S_{a2}$ 关断, $U_a = -U_{dc}/2$ 。

### 1.2 IGBT模块选型

IGBT模块的选型主要考虑额定电压和额定电流,直流侧蓄电池设计额定电压 $U_{dc}$ 为730 V,波动范围580~820 V,三电平拓扑同一桥臂中所承受的直流母线电压是不同的:

$$\begin{cases} S_{r1}, S_{r4} = U_{dcmax} = 820 \text{ V} \\ S_{r2}, S_{r3} = U_{dcmax}/2 = 410 \text{ V} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U_{dcmax}$ 为额定电压 $U_{dc}$ 的最大值  
因此IGBT模块的额定电压只需要分别选择1200 V和600 V及以上额定电压即可完全满足工况的电压要求。

本文设计的PCS额定功率 $P_{nom} = 630 \text{ kW}$ ,并网侧额定交流电压 $U_{nom} = 380 \text{ V}$ ,可以求得额定电流 $I_{nom}$ 为

$$I_{nom} = \frac{P_{nom}}{U_{nom} \cdot \sqrt{3}} = \frac{630}{380 \cdot \sqrt{3}} = 957 \text{ A} \quad (2)$$

再考虑到 1.1 倍的过载倍数,IGBT 模块的额定电流需要满足在 1 053 A 下长期安全运行。在留有 1.5 倍安全裕度的情况下,IGBT 模块的额定电流应该在 1 600 A 以上,目前市场上主流的 IGBT 模块单只没有能够满足此要求的,因此不可避免的需要并联。

为实现设计大容量的 PCS 系统,可以将功率单元进行并联,也可以在单个功率单元中将 IGBT 模块进行并联使用。功率单元并联的优点是单个功率单元设计简便,但缺点是整体的 PCS 体积大、结构设计复杂,同时各单元中 IGBT 模块的均流性差;在功率单元中 IGBT 模块直接进行并联使用可以解决这些缺点,但对于功率单元的复合母排设计、散热设计、结构设计等要求较高。

本文采用功率单元内部 IGBT 进行并联使用的设计,每个功率单元中使用额定电压为 1 200 V,额定电流为 600 A 的 FF600R12KE4 和 FF600R12KE4\_E 各 3 只进行并联,完全满足额定电压和额定电流的要求。

### 1.3 功率单元散热设计

功率单元的散热是需要重点考虑的因素之一,本系统功率单元中共含有 6 只 IGBT 模块,且发热量并不是相同的,“T”型结构中竖管 IGBT 的发热量要远大于横管 IGBT。将 3 只横管 IGBT 和 3 只竖管 IGBT 分为 2 行固定安装于铝型材散热器上。

采用每相功率单元安装 1 只蜗壳散热风机、设计独立风腔的方案,功率单元 IGBT 布局图如图 3 所示。在此布局下进行热仿真,仿真的温度云图如图 4 所示。

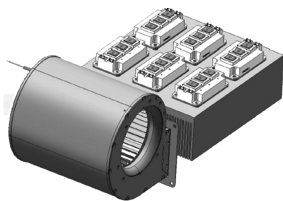


图 3 功率单元 IGBT 布局图

Fig. 3 IGBT layout of power unit

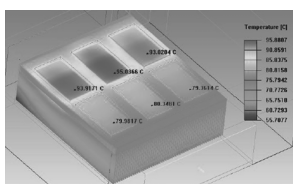


图 4 热仿真温度云图

Fig. 4 Temperature cloud map with thermal simulation

在 50℃ 的进风口温度下进行仿真,仿真结果表明最高温度约为 95.8℃,温升在 45.8℃ 左右,满足散热要求。

功率单元中还包含直流支撑电容、复合母排、控制板、驱动板以及电流采样的霍尔传感器等。

综上所述,本着绝缘安全、安装简便、结构紧凑、走线合理等原则,本文设计的功率单元模型如图 5 所示。

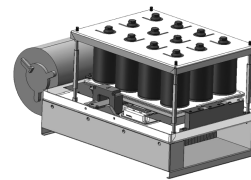


图 5 功率单元模型

Fig. 5 The model power unit

## 2 控制系统硬件电路设计

### 2.1 硬件电路控制原理及主要功能

本文所设计的 T 型三电平大容量 PCS 的控制系统基于 DSP 处理器 TMS320F28335 作为主控制芯片进行设计<sup>[8]</sup>。

控制系统硬件电路主要实现的功能包括 SVPWM 驱动信号产生、IGBT 驱动、直流侧/交流侧的电压电流采样、遥信采集、遥控输出、人机交互等。

控制系统硬件配有 2 路隔离的 RS485 和 1 路 CAN 通讯接口,用来实现与上位机及用户后台的通讯。

另外系统能够实现过/欠压保护、过流保护、过温保护、防雷击保护、IGBT 短路保护等基本的保护功能,保证系统安全运行。

### 2.2 驱动电路设计

控制系统硬件电路设计中,功能模块 IGBT 的驱动电路是硬件系统的关键部分,直接决定了 IGBT 能否安全开通关断,进而决定逆变器能否正常完成逆变。

功能模块 IGBT 的驱动电路包含驱动电源、死区时间设置、驱动功率放大、短路保护等关键技术点。

本控制系统的 IGBT 驱动电路基于 Broadcom 公司的 IGBT 驱动专用光耦 ACPL-333J 进行设计。

IGBT 具体的驱动电路设计如图 6 所示。

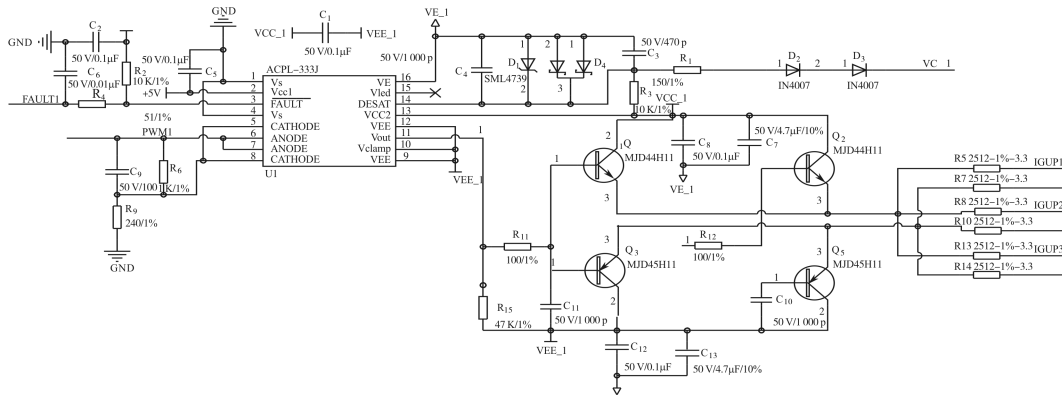


图6 IGBT驱动电路

Fig. 6 Drive circuit of IGBT

由前文所述可知,PCS系统的每相功率单元是T字型拓扑,横桥臂和竖桥臂各有3只IGBT模块并联,每1只IGBT模块中则是2只IGBT串联的拓扑。因此IGBT的驱动电路共有4路,每一路具备驱动3只并联IGBT的能力。

ACPL-333J是一款集成度高、外围电路简单的光耦芯片。具有退饱和和检测(短路保护)、欠压闭锁等保护,发生故障时能够上传故障,并带有自动复位功能。短路保护采用内部电流源给外部电容充电,当DESAT引脚的电压超过9V时,输出部分的逻辑将关闭。发生退饱和后3.6μs,驱动关闭逻辑脉冲。原边欠压锁定阈值低于3.8V时锁定,高于4.1V时开启。副边欠压锁定阈值低于11V时锁定,高于12V开启。发生这2种故障时,FAULT引脚的电平由高变低报出故障,可以通知主控CPU发生故障以整机闭锁。ACPL-333J的驱动电流最大可达1A,但在本电路中直接驱动难以满足3只IGBT并联所需要的驱动功率,因此使用MOSFET推挽电路来增强其输出功率。

### 3 软件设计

#### 3.1 软件系统架构

本文所研制开发的大容量PCS控制核心CPU为TMS320F28335,软件基于CCS3.3开发运行。

为了进一步提高DSP程序的稳定性、可移植性、可读性和可维护性,引入了RTOS操作系统<sup>[9]</sup>。操作系统的引入更有助于功能扩展和产品升级。

软件系统架构从底层硬件、DSP初始化、操作系统设置、应用软件4个方面进行划分,为使代码结构更加清晰可读,基于模块思想对软件系统架构进行设计。应用层软件以中断和任务进行细分,在中断和任务通过调用函数形式执行软件系统时序控制、运行等功能,对于各个具体软件功能实现的程序以函数的形式,根据函数功能划分存放在各个功能模块里。

本控制系统软件系统架构如图7所示。

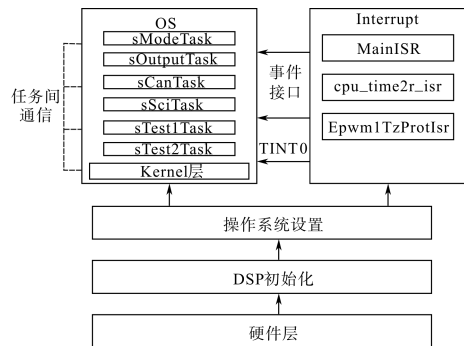


图7 软件系统架构

Fig. 7 Software architecture

#### 3.2 中断系统设计

本文软件系统中最重要的中断是定时器2中断。

定时器2中断的功能为:以6kHz开关频率进入中断处理,在定时器2计数器达到周期值会触发中断。对储能逆变器系统的模拟量进行A/D采样、捕获处理、频率和角度计算、以及储能逆变器控制算法的实现。

定时器2中断的详细流程图如图8所示。

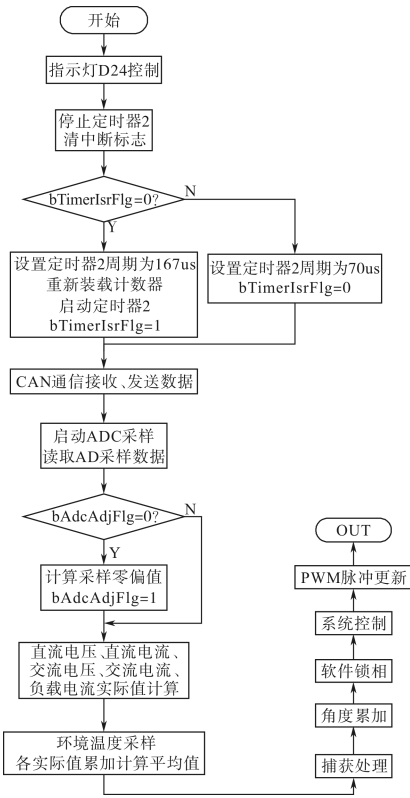


图8 定时器2中断流程图

Fig. 8 Flow chart of the timer2 interrupt

### 3.3 任务系统设计

根据功能不同将任务系统划分为几个子任务,最重要的子任务是PCS运行的模式控制任务,用来进行储能逆变器模式的时序控制及各种模式之间的切换,包括停机、待机、恒流充放电、恒压充放电、恒功率充放电、独立逆变、计时充放电以及故障模式。其流程图如图9所示。

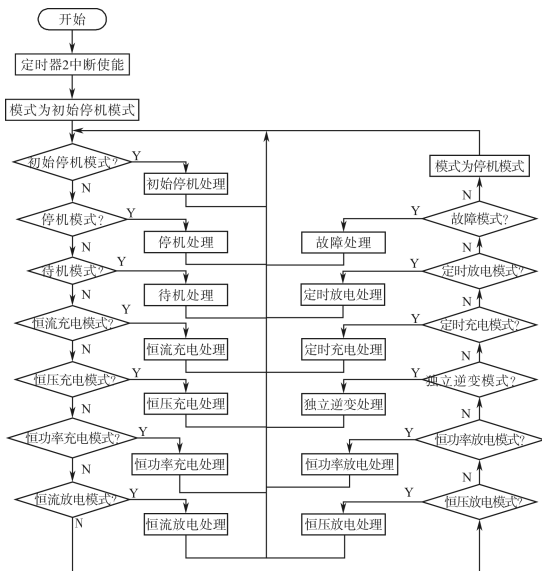


图9 模式控制任务流程图

Fig. 9 Flow chart of mode control task

## 4 仿真及试验结果分析

在仿真软件中搭建单级式T型三电平大容量PCS的仿真模型进行仿真试验,验证电池放电时逆变输出电压的线电压 $U_{ab1}$ 波形,以及并网时经过连接电抗后的电压 $U_{ab2}$ 波形,仿真波形图如图10所示。

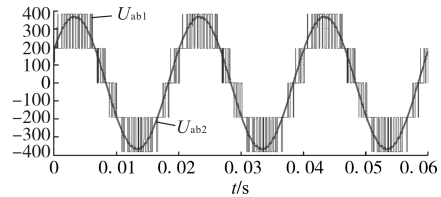


图10 PCS逆变输出电压( $U_{ab1}$ )及并网空载电压仿真波形( $U_{ab2}$ )

Fig. 10 Simulation waveforms of  $U_{ab1}$  and  $U_{ab2}$

设置直流侧电压为730V DC,开关频率为3kHz,直流电容、连接电抗的电抗率等参数均按实际设置,仿真结果表明T型三电平PCS提升了直流电压的利用率、有更高的逆变效率、输出波形更平滑、电压谐波含量更低、并网时所需滤波器更小。

对样机进行试验,PCS逆变的电压及并网电压波形如图11所示。

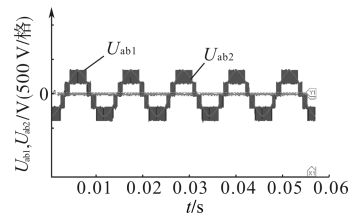


图11 PCS逆变输出并网空载电压( $U_{ab}$ )试验波形

Fig. 11 The test waveforms of PCS inverter output voltage and grid-connected no-load voltage( $U_{ab}$ )

额定容量下运行的并网电流 $I_a, I_b$ 及电压( $U_{ab}$ )波形如图12所示。

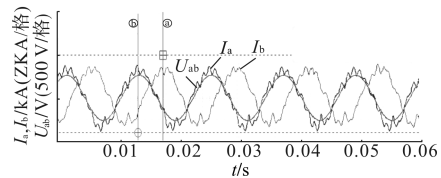


图12 并网电压和并网电流

Fig. 12 Grid-connected voltage and current

样机仿真试验时除了对PCS的预期功能进行全面测试外,还对IGBT的电气应力进行了测试。

额定负载下,IGBT的温升为 $48^{\circ}\text{C}$ ,与前文

所述热仿真结果基本吻合。在过载 1.1 倍条件下,IGBT 的温升为 54 ℃,完全满足 1.1 倍过载长期运行的要求。

另外 IGBT 的关断电压尖峰能够控制在 80 V 以内,使额定电压 1 200 V 的 IGBT 能够在足够安全的状态。

## 5 结论

本文对 630 kW 大容量 PCS 进行了方案设计,主电路采用单级式 T 型三电平拓扑,控制系统基于 TMS320F28335 型号的 DSP 进行开发设计。

详细论述了 T 型三电平 IGBT 开关时序、IGBT 选型和并联设计、功率单元散热设计、驱动电路设计、软件实时操作系统设计等关键技术点。

通过仿真和样机测试进行验证,证明了 T 型三电平拓扑的有效性和先进性,表明本文设计的大容量 PCS 所使用的单级 T 型拓扑结构简单、电压利用率高、性能优越,在储能系统中有着非常优良的推广前景。

## 参考文献

- [1] 李子欣,高范强,赵聪,等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(05):1274-1289.
- [2] 李昕,任一峰,豆妍,等. 面向微电网的新型储能系统设计[J]. 电气传动,2019,49(6):33-37.
- [3] 林小峰,崔志美,宋春宁,等. 三重化两级式电池储能 PCS 变流器拓扑结构研究[J]. 装备制造技术,2018(11):53-55.
- [4] 渠展展,惠东,侯朝勇等. 基于逆阻型 NPC 拓扑的三电平储能变流器设计与实现[J]. 电器与能效管理技术,2018(24):66-71,90.
- [5] 夏岩. 微网大功率储能变流器关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2018.
- [6] 袁泉,曾国宏,金新民. 电池储能双向变流系统控制方法的研究[J]. 机电工程技术,2018,47(8):169-172,198.
- [7] 糜晓宇,李嘉琨,胡煜. 基于三电平的大功率储能 PCS 功率拓扑结构研究[J]. 电子世界,2018(14):30-31.
- [8] 周京华,张海东. 20 kW 双级型 T 型三电平储能功率变流器研制[J]. 电力电子技术,2018,52(06):78-80,95.
- [9] 韩涵,李锐华,胡波,等. 一种电流源型双向储能变流器设计[J]. 电气技术,2017(10):16-20,26.

收稿日期:2019-08-23

修改稿日期:2019-12-30