DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.04.020　　文章编号：1000-128X(2023)04-0145-07

高功率密度智能化集成功率器件及其并联应用研究

金肩舸，杨进锋，王晓元，刘　杰，宋郭蒙，马龙昌
（中车株洲电力机车研究所有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：为突破传统功率半导体器件的封装和应用结构限制，实现变流装备的升级换代，文章提出了一种新型的高功率密度智能化集成功率器件。为验证该技术路线的可行性，以大功率变流领域内常见的并联应用场景作为研究对象，从器件参数、主电路、散热结构、驱动控制等4个主要影响因素着手，分析并验证了其良好的器件匹配性、电感均衡度、散热均温性、控制信号同步性、抗干扰能力，最后通过双脉冲试验和功率考核试验，证明了其良好的并联均流效果。试验结果表明，该技术平台从理论设计到实物验证的目标可以得到实现，具备了工程应用基础。

关键词：大功率；高压；集成化；智能化；IGBT；IPM；并联均流
中图分类号：TN303；TM46　　**文献标识码：**A

Intelligent integrated power device with high power density and research on its parallel application

JIN Jiange, YANG Jinfeng, WANG Xiaoyuan, LIU Jie, SONG Guomeng, MA Longchang

(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: To overcome the limitations on the packaging and application structure of traditional power semiconductor devices and upgrade converters, this paper proposed a novel intelligent integrated power device with high power density. Its feasibility was investigated by focusing on common parallel application scenarios in the high-power converter field. The study primarily examined the four key influencing factors: device parameters, main circuit, heat dissipation structure, and drive control. It analyzed and validated the excellent device matching, inductance balance, heat dissipation uniformity, control signal synchronization, and anti-interference capability. Subsequently, the article demonstrated the favorable parallel current sharing effect through the double pulse test and power assessment test. The experimental results show the achievement of the theoretical design and physical verification objectives of this technology platform, establishing a strong foundation for future engineering applications.

Keywords: high power; high voltage; integration; intelligent; IGBT; IPM; paralleled current sharing

0　引言

随着社会发展、工业升级、环保和能源问题的凸显，高效、绿色、便捷、智能已成为轨道交通、工业变频、电力系统等高压大功率电气传动领域的追求目标和发展方向，对核心装备的功率密度、智能化、便捷应用等也提出了更高要求，绝缘栅双极型晶体管

基金项目：国铁集团科技研究开发计划项目（K2021J046）；中国中车“十四五”科技重大专项（2021CTZ023-4）
通信作者：金肩舸（1990—），男，硕士，工程师，主要从事高压大功率变流模块研发；E-mail: jinjg163@163.com
引用格式：金肩舸, 杨进锋, 王晓元, 等. 高功率密度智能化集成功率器件及其并联应用研究[J]. 机车电传动, 2023(4): 145-151.
Citation: JIN Jiange, YANG Jinfeng, WANG Xiaoyuan, et al. Intelligent integrated power device with high power density and research on its parallel application[J]. Electric drive for locomotives,2023(4): 145-151.

（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）电流密度不仅越来越高，而且封装形式更为多样化。目前，高压IGBT器件在应用时需要将多个器件通过导热硅脂安装于散热器上，再与驱动器、母排、线束、连接器、结构件等多种部件组装为变流模块/功率组件，但这种模式的变流模块/功率组件在功率密度、组装生产和应用维护等方面存在瓶颈，也无法实现更深层次器件级智能化功能。为此，本文提出了一种高功率密度智能化集成功率器件（Power Converter Unit, PCU），通过独特的集成化设计，融合IGBT器件和变流模块技术，突破了上述限制。

在轨道交通等大功率需求场景，单个IGBT往往难以满足需求，需要通过多器件的并联实现扩容[1-3]。并联应用能够提供更大的电流能力、灵活的布局和更高的性价比，已成为提升变流模块/功率组件的功率等级最普遍的方法[4-5]。对PCU而言，同样存在并联应用的工况。并联均流性能不仅关系到系统输出能力，而且可能导致过热损坏等情况[6]。因此，有必要针对PCU的特殊结构和应用形式进行并联应用分析，以验证其可行性，作为应用参考。

1 高功率密度智能化集成功率器件

1.1 PCU概念

PCU是一种高压大功率换流单元，通过高度集成化设计，在传统器件基础上结合了功率模块的技术特征。如图1所示，其结构以功率半导体芯片、器件封装为基础，进一步在封装层面集成了低感功率互联电路、智能控制器、多类型传感器和快速插拔式水电连接器，同时以散热器代替传统IGBT器件的基板，构建一种新型智能功率模块（Intelligent Power Module, IPM），实现了机、电、热、控制、快速连接等一体化高度集成，图2为其外形及接口。

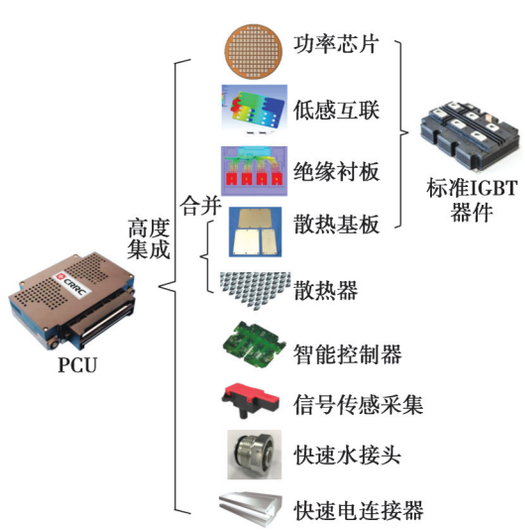


图1 PCU集成化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the integration of PCU



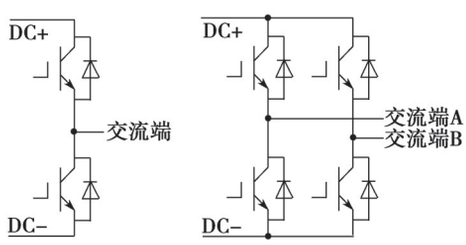
(a) 交流侧接口 (b) 直流侧接口

图2 PCU外形及其接口

Fig. 2 Outline and interface of PCU

1.2 主要参数

PCU采用兼容性封装设计，目前已开发出单相桥和两相桥2种主电路拓扑，如图3所示。单个PCU即可实现传统的相模块和两相桥模块的功能，多只PCU组合可以灵活实现当前轨道交通电力牵引系统常见的整流、逆变和斩波等电路拓扑，基本参数如表1所示。



(a) 单相桥 (b) 两相桥

图3 PCU主电路图

Fig. 3 Main power circuit diagrams of PCU

表1 PCU基本参数

Table 1 Basic parameters of PCU

参数名称	参数值或说明		
集电极-发射极电压 V_{CES}/V	6 500	3 300	3 300
主电路	单相桥	单相桥	两相桥
连续集电极电流 I_C/A	600	1 200	2×600
	750	1 600	2×800
	900	1 800	2×900
冷却方式	水冷	水冷	水冷
质量/kg	< 5	< 5	< 5

1.3 主要特点

1）高功率密度

以图4所示的6只PCU组合应用为例，因其采用高



图4 PCU组合应用示意

Fig. 4 Schematic for combined application of PCU

度集成化设计，并且可以紧凑排列，其功率密度较传统牵引变流模块高出50%以上。同时，与传统变流器相比，应用PCU的牵引变流器体积可减小26%[7]。

2）矩阵式直连应用

PCU正面为简洁的控制与交流接口，后端为水电一体快插接口，能够实现PCU至变流器的直连应用，以及矩阵式多种电路拓扑的灵活组合，可实现高效、便捷、节能、小型化的系统目标，如图5所示。

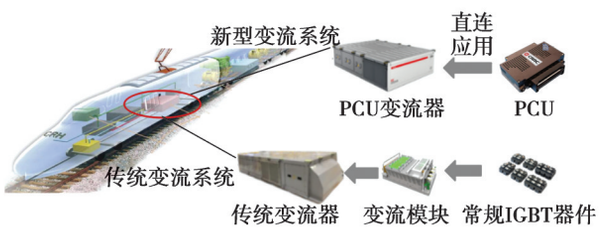


图5　PCU与传统功率器件系统应用对比

Fig. 5　Comparison of PCU and traditional power device in system application

3）智能化

PCU内含智能控制器与多类型传感器，可对电流、温度等关键参数进行监测、记录，并对故障进行处理。未来可结合故障预测与健康管理（Prognostics and Health Management, PHM）技术，不断提升自感知和自诊断能力，实现器件级健康状态与寿命评估。

4）平台化兼容

采用平台化封装设计，目前同一尺寸封装已实现多种主电路（如单相桥、两相桥）、多种电压（如3 300 V、6 500 V）、多种芯片（如平面栅、沟槽栅、逆导）兼容，因此通用性好，有利于成本控制。

2　PCU并联均流分析

2.1　器件参数

IGBT器件的均流包括静态均流和动态均流两部分，其中静态均流指导通状态下的均流，动态均流指开关动作时的均流。为获得良好的均流效果，要从器件自身参数方面考虑，各参数对均流效果影响见表2[4, 8-9]。

表2　器件参数对并联均流影响

Table 2　Influence of device parameters on parallel current sharing

器件参数	静态均流	动态均流
集电极–发射极饱和压降 $V_{CE(sat)}$	√	
转移特性（I_C-V_{GE}）		√
门极阈值电压 $V_{GE(th)}$		√
开通延迟时间 t_{don}		√
关断延迟时间 t_{doff}		√
上升时间 t_r		√
下降时间 t_f		√
二极管正向压降 V_F	√	

在IGBT并联应用过程中，通常需要进行配对，以保证器件的参数尽可能相近。1个PCU器件相当于至少2个单管IGBT，因此并联配对的筛选较常规高压单管器件更复杂。本文应用于三并联研究所用样品的关键器件参数对比如图6所示。为便于统一对比，省略了各参数的具体单位，将3个PCU各参数的平均值设置为1，以百分比表示高于/低于平均值的程度。由图6可知，3个PCU的器件参数相差不大。

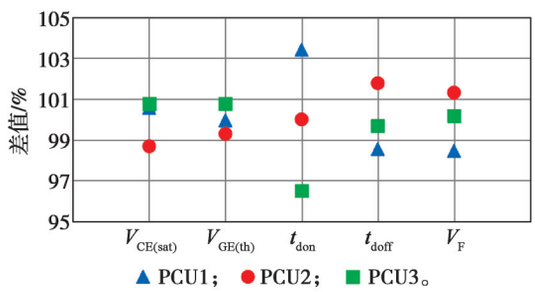


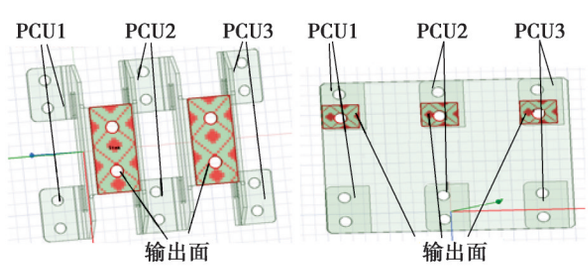
图6　三并联样品参数差异

Fig. 6　Parameter differences of triple paralleled samples

2.2　主电路

并联支路的杂散参数差异将导致电流不均衡，其中直流母线影响动态均流，交流输出则对于动态、静态均流均有影响[10-11]。当PCU组合应用时，直流侧采用复合母排快速插拔式连接，仅需矩阵式扩展或削减，模式相对固定，因此本文不做重点分析，而交流侧则相对较为多样化。在铜排并联的方案中，输出电流会由于交流铜排的不合理结构而出现不均衡[12]。

本文对2种交流铜排进行了试验验证。方案1为双“几”字形，将3个PCU并联后，再通过中间的2根线缆搭接面引出；方案2为平板形，将3个PCU并联，再采用3根线缆分别通过各自交流端子直接引出。图7为仿真模型，表3为仿真结果，以电感均衡度作为表征，电感均衡度定义为选取各支路中与杂散电感平均值相差最大的一路电感除以杂散电感平均值。由表3可知，2种方案电感均衡性均较好。



(a) 双“几”字形铜排　　(b) 平板形铜排

图7　交流母排电感仿真模型

Fig. 7　Inductance simulation model of AC busbar

2.3　散热设计

通态饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 和门极阈值电压 $V_{GE(th)}$ 分别对静态均流和动态均流起到重要作用，两者受结温的影

表3 交流母排电感仿真值

Table 3 Inductance simulation result of AC busbar nH

器件	方案1	方案2
PCU1	15.00	0.28
PCU2	14.28	0.30
PCU3	14.98	0.29
电感均衡度/%	96.8	96.6

响分析如下：

1)静态均流方面

正温度系数的器件通态饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 受结温影响，其通态饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 为[13]

$$V_{CE(sat)}=I_C R_m=I_C\left(R_{ch}+R_a+R_j+R_{epi}\right) \tag{1}$$

式中：I_C 为集电极电流；R_m 为导通电阻；R_{ch} 为沟道电阻；R_a 为积累层电阻；R_j 为JFET电阻；R_{epi} 为外延层电阻。

其中，沟道电阻 R_{ch} 占导通电阻 R_m 的主要部分，并且随结温的升高而增大，因此结温更高的器件 $V_{CE(sat)}$ 更高，并联时分担的电流更小。

2)动态均流方面

在IGBT器件开通和关断过程中，分别需要对结电容进行充/放电，使得门极电压上升/下降到门极阈值电压 $V_{GE(th)}$，这必然带来相应的开通延时和关断延时，相关的计算如下：

$$\left.\begin{aligned}V_{GE(th)}&=\left(V_{Gon}-V_{Goff}\right)\left(1-e^{-\frac{t_{don}}{\tau_{on}}}\right)+V_{Goff}\\V_{GE(th)}&=\left(V_{Gon}-V_{Goff}\right)e^{-\frac{t_{doff}}{\tau_{off}}}+V_{Goff}\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：V_{Gon} 和 V_{Goff} 分别为IGBT的开通/关断电压；t_{don} 和 t_{doff} 分别开通/关断延迟时间；τ_{on} 和 τ_{off} 分别为电容充电/放电时间常数。

由式(2)可得：

$$\left.\begin{aligned}t_{don}&=\tau_{on}\ln\left(\frac{V_{Gon}-V_{Goff}}{V_{Gon}-V_{GE(th)}}\right)\\t_{doff}&=\tau_{off}\ln\left(\frac{V_{Gon}-V_{Goff}}{V_{GE(th)}-V_{Goff}}\right)\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

由式(3)可知，门极阈值电压 $V_{GE(th)}$ 越低，t_{don} 越短，t_{doff} 越长，对应开通早、关断晚。因此，门极阈值电压 $V_{GE(th)}$ 低的IGBT器件会承受更大的电流，而门极阈值电压 $V_{GE(th)}$ 随结温升高而降低[14]，在开关动作时，结温高的器件/芯片承受更大的电流。

为了降低结温差异带来的不均流，需要从单个PCU内部散热均温和多个PCU间冷却水均流两个维度来解决。

首先，PCU自身集成了水冷散热器，该散热器采用Pin-Fin流道。参考目前常用的轨道交通典型工况，设定单个PCU损耗为2.5 kW，冷却水流量为6.5 L/min。经实测，以衬板为发热控制对象，单个PCU内部各衬板间温差小于3 K，如图8所示。



(a) 散热流道结构图 (b) 散热器均温测试图

图8 PCU散热结构及均温测试

Fig. 8 Heat dissipation structure and uniform temperature test of PCU

其次，PCU组合应用时冷却系统采用图9所示的并联冷却水路。实测6只PCU组合应用工况，各PCU间水流量均衡度可达到99.9%以上，即各PCU冷却条件相当。

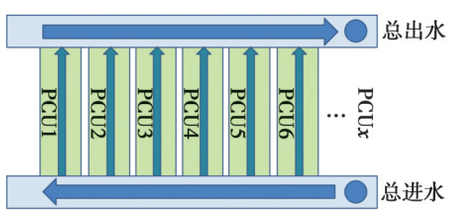


图9 PCU组合应用并联水路示意图

Fig. 9 Schematic diagram of water flow paths in parallel for combined application of PCU

综上所述，同时从单个PCU内部散热和多个PCU组合并联水路均流两方面保障了器件/组件的均温性能，有利于PCU实现良好的并联均流。

2.4 驱动控制

对于IGBT器件而言，并联应用的驱动输出电压、门极配置应保持一致，驱动回路寄生参数应尽量接近且小。此外，接收到的驱动和保护信号应有良好的同步性[15-16]。

在驱动配置和回路寄生参数层面，首先每个PCU内部集成了驱动控制板，对于同一型号的PCU，其布板和配置皆相同。其次，驱动控制板的控制及其检测接口与功率器件部分的辅助端子固定连接，而辅助端子固化于封装内，回路结构一致，如图10所示。因此，与驱动线连接方式相比，驱动回路寄生参数差异小、一致性好。

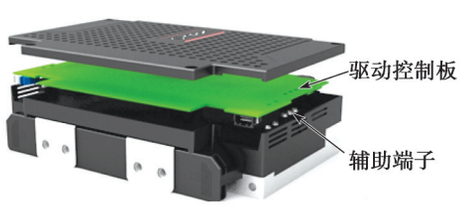


图10 PCU集成式驱动控制及其连接结构

Fig. 10 Integrated drive control and connecting structure of PCU

在控制架构层面，采用主从控制方式，如图 11 所示。上层控制单元通过光纤与各 PCU 进行通信，脉冲开关等控制指令则仅下达至 PCU1，经处理后统一通过电信号并联送至其余 PCU，避免了各 PCU 之间的时钟不同步问题，保障了信号一致性。

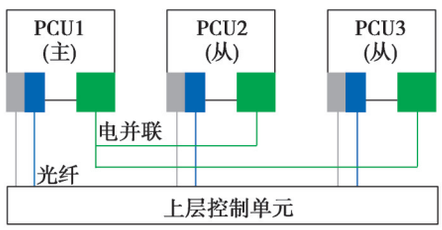
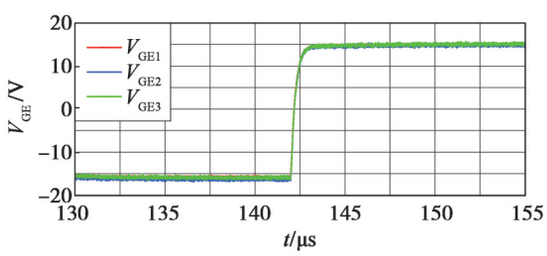


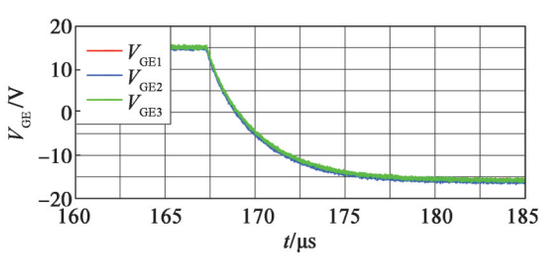
图 11　PCU 并联控制架构

Fig. 11　Parallel control architecture of PCU

对该架构进行三并联门极信号同步性测试，以下管为例，测试结果如图 12 所示。由图 12 可知，3 个并联门极信号同步性良好。



(a) 开通同步性波形

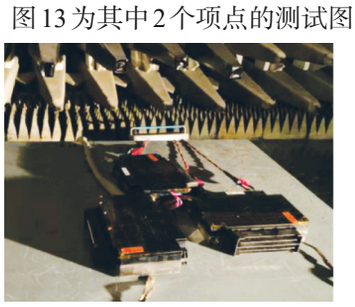


(b) 关断同步性波形

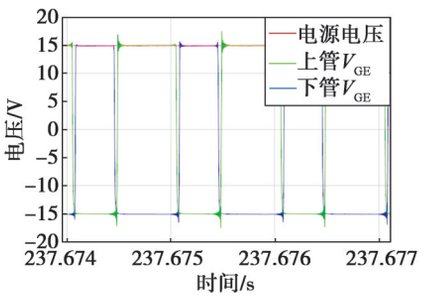
图 12　三并联门极信号同步性测试波形

Fig. 12　Synchronization test waveforms of gate signal for triple parallel application

此外，为保证该驱动控制架构的可靠性，根据 GB/T 17626 系列标准开展了三并联的电磁兼容试验，各试验项点均未发生故障停机、脉冲封锁，以及脉冲频率、占空比、死区和最小脉宽异常、电路板或器件失效等故障，图 13 为其中 2 个项点的测试图。



(a) 射频电磁场辐射抗扰度试验



(b) 浪涌(冲击)抗扰度试验

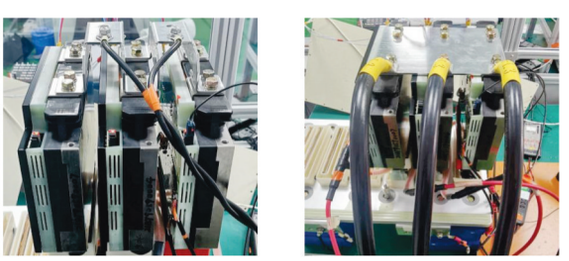
图 13　电磁兼容试验

Fig. 13　Electromagnetic compatibility test

3　PCU 三并联试验

3.1　三并联双脉冲试验

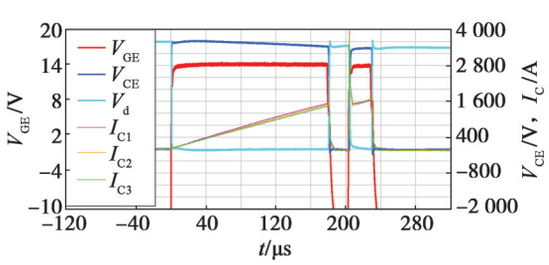
图 14 为 PCU 三并联双脉冲试验图，以下管测试为例（常温），并采用前文所述的 2 种交流铜排并联的方式进行对比验证。试验波形如图 15 所示，I_{C1}、I_{C2} 和 I_{C3} 分别对应图 14 中从左至右的 3 个 PCU 电流。



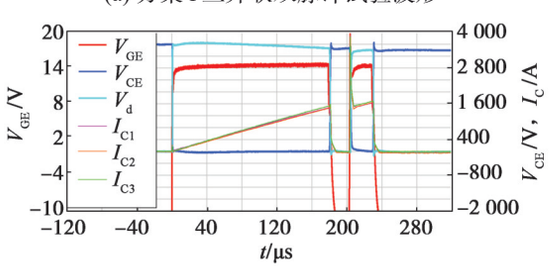
(a) 方案 1　　(b) 方案 2

图 14　三并联双脉冲试验实物图

Fig. 14　Images of triple paralleled double pulse test



(a) 方案 1 三并联双脉冲试验波形



(b) 方案 2 三并联双脉冲试验波形

图 15　三并联双脉冲试验波形(电流放大 3 倍)

Fig. 15　Waveforms of triple paralleled double pulse test (with current magnified 3 times)

分析图 15 可知，在静态均流方面，方案 1 的电流均流度为 98.97%，方案 2 的电流均流度为 98.73%；在

动态均流方面，以开通为例，方案 1 的电流均流度为 96.49%，方案 2 的电流均流度为 96.23%。由此可见，2 种方式双脉冲测试均有较好的均流效果，并且区别较小。

3.2 三并联功率试验

图 16 为 PCU 三并联功率试验电路图，以左侧三并联作为 A 相，陪试品右侧三并联作为 B 相，由中间直流电源作为输出，开展 H 桥逆变考核，具体参数如表 4 所示。

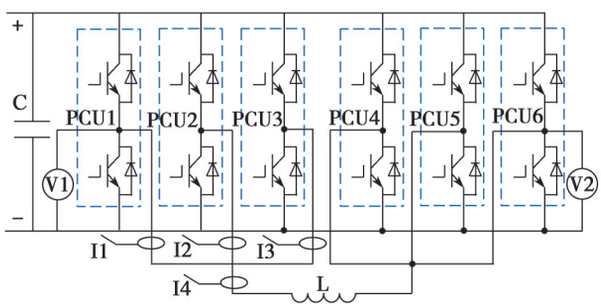


图 16 三并联功率试验电路图

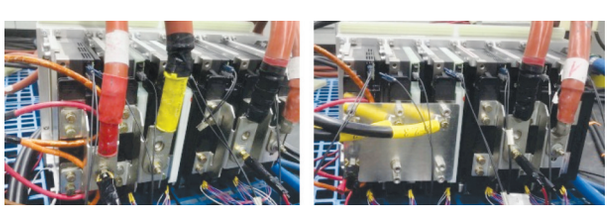
Fig. 16 Circuit diagram of triple paralleled power test

表 4 三并联功率试验条件

Table 4 Conditions of triple paralleled power test

参数项目	直流电压/V	开关频率/Hz	输出频率/Hz	负载类型
参数值或说明	3 600	350	50	纯电感

交流侧接线与三并联双脉冲连接方式相对应，实物如图 17 所示，典型波形如图 18 所示。



(a) 方案 1 (b) 方案 2

图 17 三并联功率试验实物

Fig. 17 Images of triple paralleled power test

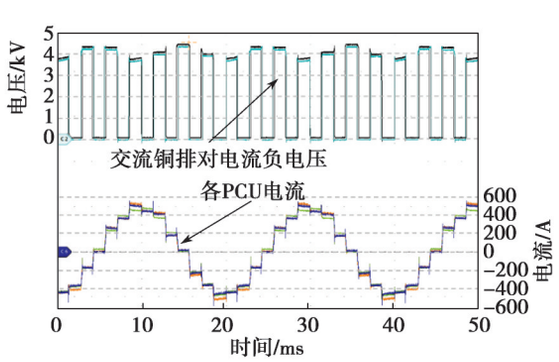


图 18 三并联功率试验典型波形

Fig. 18 Typical waveforms of triple paralleled power test

以交流输出并联总电流的有效值 150~1 050 A 进行多点考核，对 A 相 3 个并联 PCU 交流输出进行对比记录，试验数据如图 19 所示。由图 19 可知，在总电流超过 300 A 后，PCU 均流产生明显拐点，2 种方案的均流度开始接近，均可保持 97% 以上的均流效果。

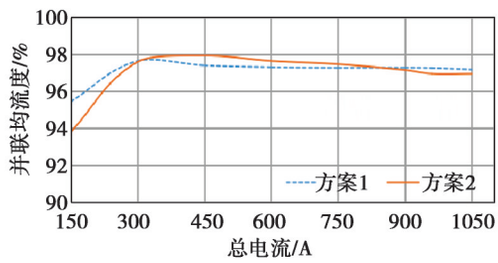


图 19 三并联功率试验均流曲线

Fig. 19 Current sharing curve of triple paralleled power test

4 结束语

本文介绍了 PCU 独特的集成封装形式、应用模式和控制架构，并针对其特点开展了并联研究。从对主要影响因素分析和测试、三并联均流试验结果可知，PCU 并联应用具有良好的均流性能，这表明了该技术路线的可行性，为实际应用提供参考。后续将根据实际应用条件以及矩阵式扩展特点，进一步开展工程化应用研究。

参考文献：

[1] SHAMMAS N Y A, WITHANAGE R, CHAMUND D. Review of series and parallel connection of IGBTs[J]. IEE proceedings - Circuits, devices and systems, 2006, 153(1): 34-39.

[2] 祁善军, 翁星方, 宋文娟, 等. 大功率 IGBT 模块并联均流特性研究[J]. 大功率变流技术, 2011(6): 10-14.
QI Shanjun, WENG Xingfang, SONG Wenjuan, et al. Research on even flow of high-power IGBT module in parallel [J]. High power converter technology, 2011(6): 10-14.

[3] 凌晨, 胡安, 唐勇. IGBT 并联动态不均流温度特性研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(11): 121-123.
LING Chen, HU An, TANG Yong. Research on temperature characteristic of IGBT parallel connection dynamic current imbalance[J]. Power electronics, 2011, 45(11): 121-123.

[4] 李华, 杨光, 杨涛, 等. 6.5 kV 高压 IGBT 的并联应用研究[J]. 机车电传动, 2011(4): 14-16.
LI Hua, YANG Guang, YANG Tao, et al. Application research on parallel-using of 6.5 kV high-voltage IGBT[J]. Electric drive for locomotives, 2011(4): 14-16.

[5] 忻兰苑, 孙康康, 龚喆, 等. 功率组件 IGBT 并联均流设计[J]. 大功率变流技术, 2017(1): 18-23.
XIN Lanyuan, SUN Kangkang, GONG Zhe, et al. Current balancing design of paralleled-IGBT in power assembly[J]. High power converter technology, 2017(1): 18-23.

[6] LETOR R. Static and dynamic behavior of paralleled IGBTs [J]. IEEE transactions on industry applications, 1992, 28(2):

395-402.

[7] 丁荣军, 窦泽春, 罗海辉. 高压大容量功率半导体器件技术及其应用[J]. 机车电传动, 2023(2): 1-13.
DING Rongjun, DOU Zechun, LUO Haihui. Technology and application of high-voltage and large-capacity power semiconductor devices[J]. Electric drive for locomotives, 2023(2): 1-13.

[8] 王位, 李卫超, 林城美. 大容量IGBT并联均流检测技术研究[J]. 电气传动, 2017, 47(6): 71-76.
WANG Wei, LI Weichao, LIN Chengmei. Research on detection method for current balancing of parallel connected high power IGBT modules[J]. Electric drive, 2017, 47(6): 71-76.

[9] 张晋芳, 梁海刚, 刘志敏. 4 500 V高压大电流IGBT并联应用研究[J]. 铁道机车与动车, 2014(6): 6-8.
ZHANG Jinfang, LIANG Haigang, LIU Zhimin. Research on parallel application of 4 500 V high voltage and high current IGBT[J]. Railway locomotive and motor car, 2014(6): 6-8.

[10] 福尔克, 郝康普. IGBT模块: 技术、驱动和应用[M]. 韩金刚, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016: 247-261.
VOLKE A, HORNKAMP M. IGBT modules: technologies, driver and application[M]. HAN Jingang, translated. Beijing: China Machine Press, 2016: 247-261.

[11] 吴建雄, 张洪浩, 陈艺峰. 多IGBT并联模块的交直流母排设计研究[J]. 大功率变流技术, 2017(2): 27-32.
WU Jianxiong, ZHANG Honghao, CHEN Yifeng. Study of DC bus-bar and AC bus-bar design for multi paralleled-IGBT module[J]. High power converter technology, 2017 (2): 27-32.

[12] 杨笑宇, 刘伟增, 马超群, 等. 交流铜排结构对功率模块并联均流的影响[J]. 电力电子技术, 2013, 47(5): 100-103.
YANG Xiaoyu, LIU Weizeng, MA Chaoqun, et al. Influence of AC copper bar structure on current sharing of paralleled IGBT modules[J]. Power electronics, 2013, 47(5): 100-103.

[13] 王雪松, 赵争鸣, 袁立强, 等. 应用于大容量变换器的IGBT并联技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 155-162.
WANG Xuesong, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Parallel technique for IGBT modules applied in high-power converter[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2012, 27(10): 155-162.

[14] 本达, 戈沃, 格兰特. 功率半导体器件——理论及应用[M]. 吴郁, 张万荣, 刘兴明, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 257.
BENDA V, GOWAR J, GRANT D A. Power semiconductor devices: theory and applications[M]. WU Yu, ZHANG Wanrong, LIU Xingming, translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 257.

[15] 马伯乐, 杨光, 忻力. 大功率IGBT直接并联应用技术研究[J]. 机车电传动, 2014(1): 11-15.
MA Bole, YANG Guang, XIN Li. Application research on parallel using of high-power IGBT[J]. Electric drive for locomotives, 2014(1): 11-15.

[16] 马龙昌, 张东辉, 杨光, 等. IGBT并联应用技术研究[J]. 大功率变流技术, 2015(2): 35-39.
MA Longchang, ZHANG Donghui, YANG Guang, et al. Research on the IGBT paralleling application[J]. High power converter technology, 2015(2): 35-39.

收稿日期：2023-04-06
修回日期：2023-06-26