



PCU 器件在双层高速动车组的应用研究

李 华¹, 罗荣争¹, 胡云卿¹, 彭 程¹, 刘 杰², 杨进锋²

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 双层动车组由于其在运能、运营经济性等方面具备显著优点, 成为国内外各大主机厂商研制与应用的热点方向。为满足适应我国高速双层动车组系统顶层技术指标要求, 文章基于新一代功率器件PCU组件的高集成、智能化、高功率密度及方便应用特点, 设计了一种适用于双层高速动车组的PCU牵引变流器, 阐述了PCU的器件特性、PCU器件性能测试、PCU变流器的设计等, 并通过试验验证了PCU器件及PCU变流器性能良好、运行可靠, 满足总体设计和应用的要求。

关键词: PCU; 双层动车组; 主辅一体; 牵引变流器; 高速动车组

中图分类号: U292.91⁺4; U264.3⁺7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)03-0126-07

0 引言

相比传统的单层动车组, 双层动车组因通常可提高30%以上运能, 能有效缓解繁忙线路或者繁忙时段运能紧张的问题, 并提高运营经济性而得到广泛关注^[1-3]。国内外各大主机厂也纷纷开展了双层动车组的研制及推广应用工作, 法国的TGV Duplex动车组, 经历了长时间的运营和多轮改进设计, 能提升50%的客运量, 持续运行时速可达320公里^[3]; 日本的新干线E4系双层列车, 时速可达240公里, 16节车厢编组的坐席定员达1 634人, 是当前世界上实际载客运营的最大载客量高速列车^[1-2]; 2018年, 中车株洲电力机车有限公司成功研制动力分散型双层动车组, 该车能够实现4/6/8节编组, 其8节编组车型全车坐席达到820个。

双层动车组为满足旅客舒适性要求, 需保持良好的双层空间并实现车体的低重心及低地板设计, 和单层动车组通常将牵引变流器安装在车下设备舱或车顶不同, 双层动车组的牵引变流器安装在车厢内, 不仅列车对设备安装空间及设备重量要求极为苛刻, 而且要考虑设备安装在车厢内时的电磁兼容、噪声等要求^[4-5]。

因PCU器件具有高集成、智能化、高功率密度及方便应用的特点^[6-7], 在双层动车组牵引变流器的设计中具有明显优势。本文从PCU智能功率模块的特点出发, 重点分析PCU的主要性能及其在双层高速动车组牵引变流器中的应用优势, 同时给出其在高速双层动车组的实际应用效果及试验验证情况等。

1 PCU器件的特点

PCU器件为一种高度集成的智能化功率模块, 通常情况下, PCU器件内部集成了实际应用所需要的特定功能的电路拓扑、配套的门极驱动器、脉冲分配及脉冲处理单元、器件状态监测电路及温度监测功能等^[8-9], PCU组件则通常包含了多只PCU器件、配套散热器及滤波电容(选配), 如图1所示。

PCU器件和IGBT器件在性能、功能及应用特点方面的比较见表1。

通过表1比较可以发现, PCU器件在智能化、功能集成及方便应用等方面优势明显, 可实现在空间体积下, 变流器工作在更高开关频率或者可输出更大的电流, PCU的这一特点为设计更高集成度的双层动车组

基金项目: 国家重点研究开发计划(2022YFB4300100)

通信作者: 罗荣争, 男, 从事牵引变流器的设计研究工作; E-mail: luorzh@csrzc.com

引用格式: 李华, 罗荣争, 胡云卿, 等. PCU器件在双层高速动车组的应用研究[J]. 机车电传动, 2025(3): 126-132.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.016.

Citation: LI Hua, LUO Rongzheng, HU Yunqing, et al. Research on the application of PCU devices in double-deck high-speed EMUs[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 126-132.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.016.

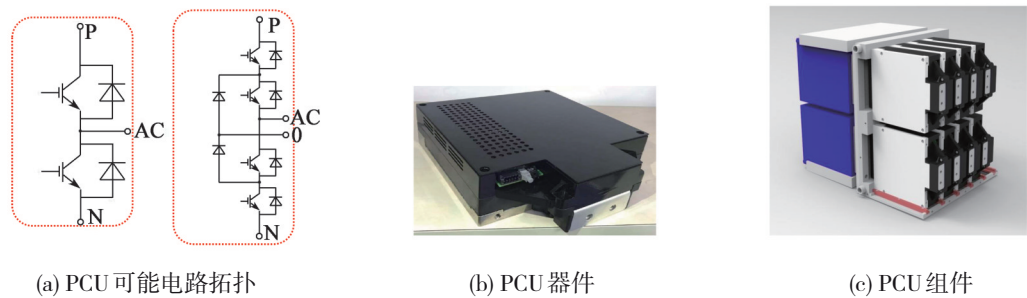


图1 PCU拓扑、PCU器件及PCU组件

Fig. 1 PCU topology, devices, and components

表1 PCU和IGBT的对比

表2 PCU组件试验条件及试验结果

Table 1 Comparison between PCU and IGBT			
对比项点	IGBT	PCU	备注
集成门极驱动	否	是	
集成脉冲分配	否	是	
智能化功能	故障存储	是	
	寿命预测	是	
	身份识别	是	
	数字化保护	是	
具备温度采集功能	否	是	部分IGBT有NCT温度采集功能
能多模块安装应用	否	是	

Table 2 Test conditions and results of PCU components			
试验项点	试验条件	试验结果	结论
典型开关特性试验 (波形参见图3)	直流电压: 3 600 V	U_{ce-max} : 4 011 V	正常
	负载: 阻感	I_{omax} : 1 279 A	
典型短路性能试验 (波形参见图4)	直流电压: 3 600 V	U_{ce-max} : 3 675 V	正常
	负载: 短接铜排	I_{omax} : 3 980 A	

变流器带来了方便。

2 PCU组件性能测试

为验证PCU器件的基本性能，通常通过地面PCU组件试验台进行高低温工况下的开关特性及短路特性等试验，同时根据PCU器件的开通关断速度来评估和计算器件损耗，并为PCU器件适配合适的门极驱动参数，PCU组件试验台及试验电路如图2所示。

双层高速动车所应用的PCU器件为6 500 V/750 A等级双管封装。PCU开关特性试验通常包括常温及高温下的单脉冲试验及双脉冲试验，根据实际需要可补充进行扫频试验，典型高温工况下的双脉冲试验结果见表2及图3；PCU短路特性试验通常包括常温及高温下的Ⅰ类短路试验及Ⅱ类短路试验，典型高温下的Ⅰ类短路试验结果参见表2及图4。

3 PCU变流器设计

双层动车组每节动车配置两台牵引变流器，由于变流器安装在设备舱内，对其重量、体积要求苛刻^[10]，因此采用株洲中车时代电气股份有限公司自主研制的PCU功率组件替代传统的IGBT，PCU变流器与传统IGBT变流器相比，具有以下优势：

①功率密度更高，PCU变流器功率密度1.02 kVA/kg（带高频辅变），相对于CR400AF牵引变流器功率密度0.73 kVA/kg提升39.7%。

②由于PCU功率组件芯片与散热器热阻降低，芯片温升比传统IGBT芯片温升降低4 K，可靠性更高。

③PCU功率组件长度尺寸更小，更有利于双层动车组走廊两侧布置深度尺寸受限的空间利用，更有利于变流器总体布局，可制造性和可维护性好。

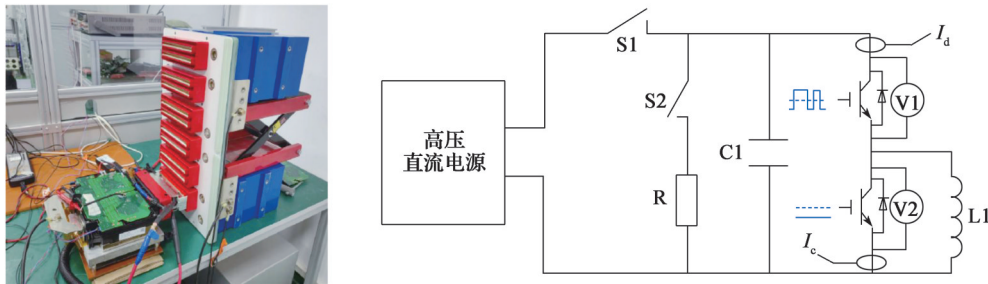
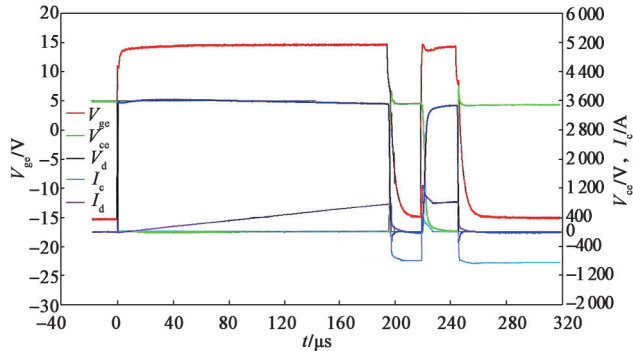


图2 PCU组件试验台及试验电路

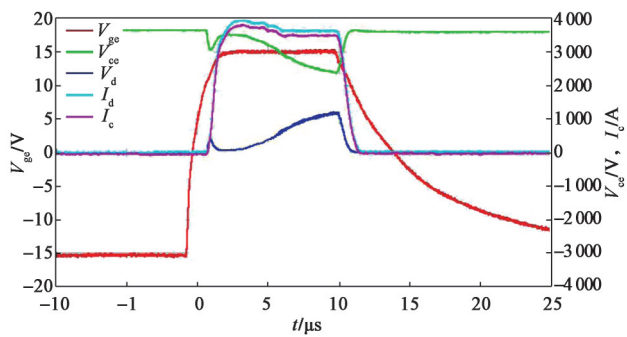
Fig. 2 PCU component test bench and test circuit



V_{ge} : 上管门极电压; V_{ce} : 上管电压; V_d : 下管电压; I_c : 下管电流; I_d : 上管电流。

图3 PCU 开关特性试验结果
Fig. 3 PCU switching characteristics test

基于PCU的牵引变流器方案,变流器为主辅一体集成装置,包括四象限单元、主逆变单元和辅助逆变单元。变流器采用架控方式,一台变流器为一个转向



V_{ge} : 上管门极电压; V_{ce} : 上管电压; V_d : 下管电压; I_c : 下管电流; I_d : 上管电流。

图4 PCU 短路性能试验结果
Fig. 4 PCU short-circuit performance test

架的2台牵引电机供电,牵引变流器功率器件采用PCU功率组件,同时集成高频辅变和冷却系统。

PCU牵引变流器的主电路如图5所示。

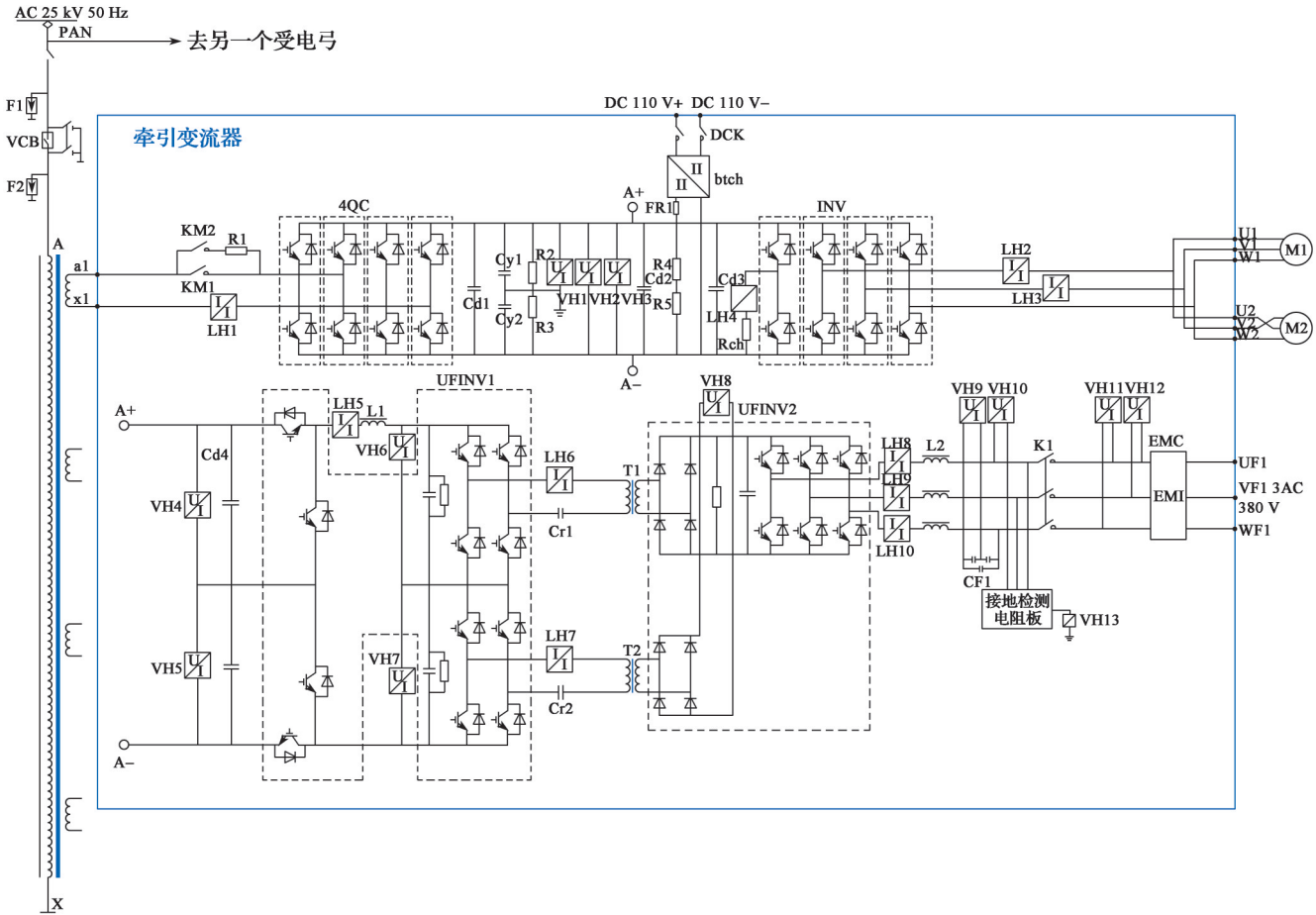


图5 牵引变流器主电路图
Fig. 5 Main circuit diagram of traction converter

PCU牵引变流器的主要技术参数如表3所示。

根据双层高速动车组车体设备舱布置,双层动车组的牵引变流器(图6)安装在车厢内,对其安装空间及重量要求极为苛刻,且牵引变流器轻量化设计时要确保系统的基本性能不受影响,即在实现柜体减重的同时,柜体强度又能满足外部振动的要求。为实现此目标,牵引变流器采用了多种全新的技术:首次采用公

司自主研发的PCU功率组件,在实现小型化的同时提高变流器可维护性;采用高频辅变技术助力变流器的进一步轻量化;采用TEC4000控制平台提高控制精度和智能化程度。相比时速350公里复兴号变流器(图7),双层车变流器在容量提升7%的同时,体积缩小7%,重量降低30%。在变流器柜体完成设计后,按照标准GB/T 21563的相关要求对其进行横向、纵向和垂

向3个方向的振动冲击试验, 试验结果表明相关性能满足标准的技术指标要求。

表3 变流器主要技术参数

Table 3 Main technical parameters of converter

项目	参数或说明	
四象限输入	额定输入电压	AC 1 900 V/50 Hz
	额定输入电流	AC 865 A
	最大输入电流	AC 961 A
中间直流回路	中间直流电压	DC 3 600 V
VVVF 逆变器	输出电压范围	三相 AC 0~2 808 V
	额定输出电流	三相 AC 345 A
	最大输出电流	三相 AC 480 A
辅助逆变器	额定输出容量	130 kVA
	输出电压	三相 AC 380 V/50 Hz
冷却系统	冷却方式	强迫水循环冷却
	变流器额定效率	≥97%
总体参数	外形尺寸	2 000 mm×930 mm×2 010 mm
	质量	1 410 kg

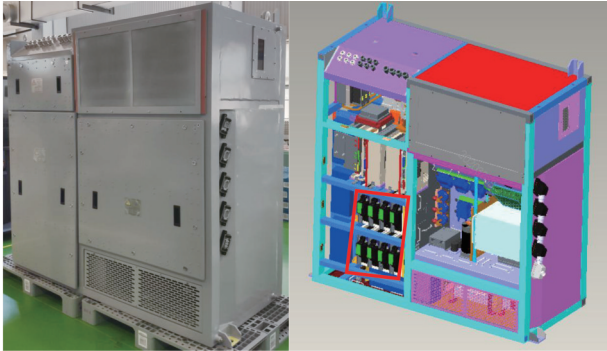


图6 时速350公里双层动车组牵引变流器

Fig. 6 Traction converter for 350 km/h double-deck EMUs

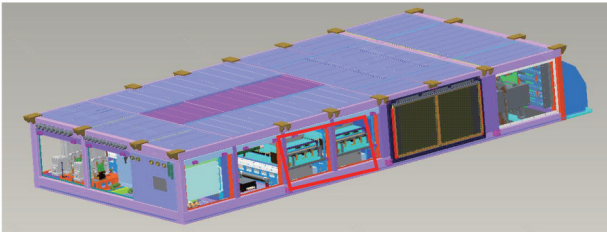


图7 CR400AF 动车组牵引变流器

Fig. 7 Traction converter for CR400 AF EMU

4 PCU变流器的试验验证

为验证牵引变流器的相关性能和PCU功率组件应用稳定性, 根据GB/T 25122.1—2018《轨道交通 机车车辆用电力变流器 第一部分: 特性和试验方法》进行牵引变流器的型式试验和研究性试验。

4.1 变流器温升试验

在牵引变流器额定负载工况下, 通过预先布置的温度传感器采集了关键部件的温度数据, 当变流器连

续工作温升达到稳定时(判定器件温升1 h内变化不超过1 K), 取温度最高的数据进行计算。温升稳定后, 在热交换器滤网位置堵风量, 堵住入风口面积的(15±1)% (居中堵风), 待散热器台面温度再次达到稳定。温升试验结果参见图8、图9及表4、表5。

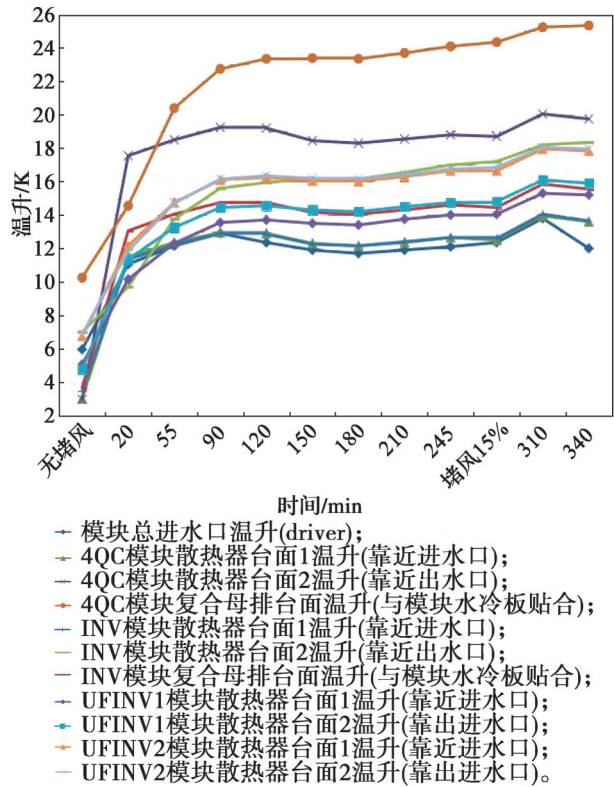


图8 时速350公里双层动车组牵引变流器温升试验结果

Fig. 8 Results of temperature rise test of traction converter for 350 km/h double-deck EMU

牵引变流器的温升试验结果见表4。

在变流器额定负载, 两种堵风工况(不堵风/堵风15%)下, 四象限模块的进出水口温差为6.20 K, 逆变模块的进出水口温差为1.90 K, 四象限PCU模块的功率损耗比逆变模块大, 原因为恒功区额定转速下四象限开关频率和载流比逆变模块高。高频辅变负载容量比较小, 只有136 kVA, 两个模块的进出水口温差不大, 都在1 K以内, 裕量较为充足。

变流器冷却风温升为9.85 K, 连接PCU模块直流侧的中间回路短母排温升比L型长母排高10.00 K, 支撑电容温升为8.75 K, 满足温升小于15 K的要求, 高频辅变水冷变压器温升为59.15 K, 满足温升小于75 K的要求, 斩波电感温升为15.40 K, 三相电抗器温升为20.10 K, 均远小于要求值115 K, 其他冷却系统部件如风机水泵温升均在22.00 K以下, 满足实际应用要求。

为提升变流器功率器件智能化预警及寿命管理机制, 要求PCU功率组件内部均集成有温度采集元件, 通过上位机可实时监控器件基板温度, 在温升试验中选取部分测点的温升(相较变流器进风口)结果数据见表5。

表 4 牵引变流器的温升试验结果

Table 4 Results of temperature rise test of traction converter K

工况	模块总进水口温升	模块总进、出水口温差	4QC 模块散热器台面 1 温升 (进水口)	4QC 模块散热器台面 2 温升 (出水口)
无堵风	12.35	3.00	12.50	18.70
堵风 15%	12.00	3.00	13.60	19.75
工况	4QC 模块进、出水口温升	INV 模块散热器台面 1 温升 (进水口)	INV 模块散热器台面 2 温升 (出水口)	INV 模块进、出水口温升
无堵风	6.20	12.60	14.45	1.85
堵风 15%	6.15	13.65	15.55	1.90
工况	UFINV1 模块散热器台面 1 温升 (进水口)	UFINV1 模块散热器台面 2 温升 (出水口)	UFINV1 模块散热器进、出 水口温升	UFINV2 模块散热器台面 1 温升 (进水口)
无堵风	14.05	14.80	0.75	16.65
堵风 15%	15.20	15.90	0.70	17.85
工况	UFINV2 模块散热器台面 1 温升 (出水口)	UFINV2 模块散热器进、出水口 温升		
无堵风	16.85	0.20		
堵风 15%	17.95	0.10		
工况	变流器进、出风口温差	柜内空气温升	中间回路母排 1 温升	中间回路连接母排 2 温升
无堵风	9.10	8.10	23.35	34.40
堵风 15%	9.85	8.75	24.85	35.65
工况	4QC 模块支撑电容温升	三相滤波电容温升	主风机 1 电机机壳温升	主风机 2 电机机壳温升
无堵风	21.25	13.55	21.25	19.20
堵风 15%	23.75	14.45	21.75	20.00
工况	水泵温升	高频辅助变压器铁芯温升	斩波电感温升	三相滤波电抗器温升
无堵风	13.55	58.35	14.05	18.60
堵风 15%	14.55	59.15	15.40	20.10
工况	放电电阻附近空气温升			
无堵风	20.20			
堵风 15%	20.95			

表 5 PCU 变流器的温升试验结果

Table 5 Results of temperature rise test of PCU converter K

项目	工况	4QC 模块基板 测点 1 温升	4QC 模块基板 测点 2 温升	4QC 模块散热器台面 1 温升(进水口)	4QC 模块散热器台面 2 温升(出水口)
参数或说明	无堵风	20.40	20.20	12.50	18.70
项目	工况	INV 模块基板测点 1 温升	INV 模块基板测点 2 温升	INV 模块基板测点 3 温升	INV 模块基板测点 4 温升
参数或说明	无堵风	17.20	18.00	17.50	18.30
项目	工况	CHOP 基板温升	INV 模块散热器台面 1 温升(进水口)	INV 模块散热器台面 2 温升(出水口)	
参数或说明	无堵风	12.70	12.60	14.45	

从以上数据可知，PCU 功率组件内部均集成的温度采集元件功能正常，且模块内置采集的温度数据能更加精准地呈现每支桥臂功率器件的内部温度，可为变流器功率器件智能化预警及寿命管理机制提供数据支撑。

持续温升试验表明，变流器内部 PCU 功率组件和其余关键部件温升趋于稳定，性能指标满足系统设计要求。

4.2 时速 350 公里双层动车组变流器电气性能测试

为验证 PCU 功率组件在变流器电气系统中的运行

稳定性及相关电气性能，在不同中间电压等级及输出电流工况下进行电气性能试验，并测量相关电压、电流波形。

①中间电压 2 500 V，三相负载电流在 345 A rms、450 A rms、480 A rms 工况下运行正常，开关管电压过冲约 1 000 V。

②中间电压 3 000 V，三相负载电流在 200 A rms、345 A rms、400 A rms 工况下运行正常，开关管电压过冲约 1 100 V。

③中间电压 3 800 V，三相负载电流在 435 A rms 工况下运行正常，开关管电压过冲约 650 V。

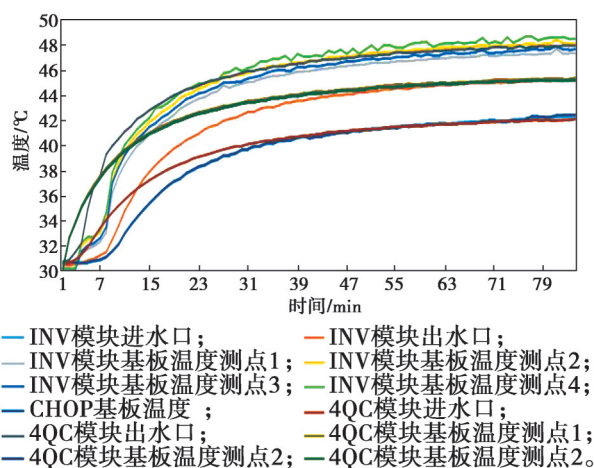
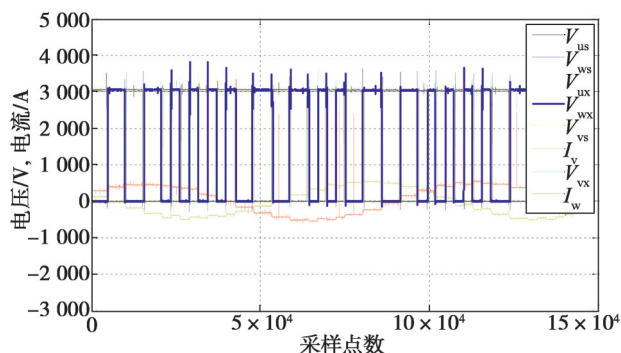


图9 PCU组件温度变化趋势图

Fig. 9 Temperature trend chart of PCU components

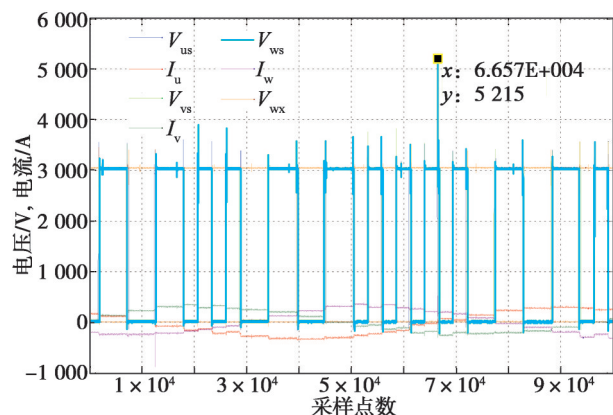
图 10、图 11 分别给出了中间电压 3 000 V 下三相负载电流在 400 A rms、280 A rms 工况下的测试试验结果。



V_{us} : u相上管电压; V_{ux} : u相下管电压; V_{vs} : v相上管电压; V_{vx} : v相下管电压; V_{ws} : w相上管电压; V_{wx} : w相下管电压; I_v : v相交流输出电流; I_w : w相交流输出电流。

图10 中间电压3 000 V和三相负载电流400 A_{rms}下相关波形

Fig. 10 Related waveforms under an intermediate voltage of 3 000 V and a three-phase load current of 400 A rms



V_{us} : u相上管电压; V_{vs} : v相上管电压; V_{ws} : w相上管电压; I_{u} : u相交流输出电流; I_{v} : v相交流输出电流; I_{w} : w相交流输出电流。

图11 中间电压3 000 V和三相负载电流280 A_{rms}下相关波形

Fig. 11 Related waveforms under an intermediate voltage of 3 000 V and a three-phase load current of 280 A rms

电气性能试验结果表明, PCU 功率组件在不同电压、不同电流等级下的输入输出波形正常, PCU 器件关断电压过冲值也满足要求, 相关测试数据满足部件限值要求及系统应用要求。

5 结束语

目前，适用于双层高速动车组的PCU变流器已完成整车调试，试验结果良好，PCU变流器相较于传统的IGBT变流器，功率密度提升39%，且更适配于双层动车组设备舱安装布局，PCU器件在双层高速动车组的成功应用，能有效助力客运量提升，满足节假日高客流量需求；同时，新型功率器件PCU组件在高速动车组领域的首次成功应用，标志着我国在PCU功率组件设计和集成方面实现了关键核心技术突破，我国高速动车组在世界舞台上将更具有竞争力。

参考文献:

- [1] 王希刚. 时速350公里双层动车组研发展望[J]. 装备制造技术, 2018(1): 81-84.
WANG Xigang. Development prospect of 350 km/h double-deck EMU[J]. Equipment manufacturing technology, 2018 (1): 81-84.
- [2] 繆根欣. 日本新干线E4系列高速电动车组[J]. 电力牵引快报, 1997(4): 60.
MIAO Genxin. Japanese Shinkansen E4 series high-speed electric multiple units[J]. Electric traction express, 1997 (4): 60.
- [3] 繆根欣. 法国双层动车组的发展[J]. 电力牵引快报, 1997 (3): 27-36.
MIAO Genxin. The development of double decker high-speed trains in France[J]. Electric traction express, 1997(3): 27-36.
- [4] 张庆刚, 乔珂, 曹源. 国外高速双层动车组的发展及对我国的启示[J]. 中国铁路, 2018(7): 103-107.
ZHANG Qinggang, QIAO Ke, CAO Yuan. The development of high-speed trains abroad and its enlightenment to China[J]. World railways, 2018(7): 103-107.
- [5] 丁懿, 邹档兵, 郑钢, 等. 双层动车组牵引系统关键技术分析[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(3): 47-50.
DING Yi, ZOU Dangbing, ZHENG Gang, et al. Key technology analysis of traction system for double-decker EMUs [J]. Railway locomotive & car, 2018, 38(3): 47-50.
- [6] 鄢桂珍, 潘光亮, 郭建强. 速度350 km/h双层动车组动车降噪设计[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(2): 37-41.
YAN Guizhen, PAN Guangliang, GUO Jianqiang. Noise reduction design of 350 km/h double deck EMU[J]. Railway locomotive & car, 2021, 41(2): 37-41.
- [7] 金盾舫, 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.

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.

[8] 刘海涛, 刘永江, 李华, 等. 轨道交通变流器共性技术研究综述[J]. 机车电传动, 2024(4): 1-16.

LIU Haitao, LIU Yongjiang, LI Hua, et al. Review on key generic technologies for railway converters[J]. Electric drive for locomotives, 2024(4): 1-16.

[9] 漆宇, 窦泽春, 丁荣军. 轨道交通用功率半导体器件应用技术的研 究[J]. 机车电传动, 2020(1): 1-8.

QI Yu, DOU Zechun, DING Rongjun. Research on power semiconductor converter technology for rail transit applications[J]. Electric drive for locomotives, 2020(1): 1-8.

[10] ZHAO Hongwei, LIANG Jianying, LIU Changqing. High-speed EMUs: characteristics of technological development and trends[J]. Engineering, 2020, 6(3): 234-244.

Research on the application of PCU devices in double-deck high-speed EMUs

LI Hua¹, LUO Rongzheng¹, HU Yunqing¹, PENG Cheng¹, LIU Jie², YANG Jinfeng²

(1. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Double-deck electric multiple units (EMUs) have become a key focus for research, development, and application among major manufacturers worldwide due to their significant advantages in transport capacity and the economic efficiency of operation. To meet the top-level technical requirements for China’s high-speed double-deck EMU systems, this article presents the design of a power converter unit (PCU) traction converter tailored for high-speed double-deck EMUs, leveraging the high integration, intelligence, high power density, and user-friendly features of next-generation PCU component technology. The article elaborates on the characteristics of PCU devices and their performance testing, as well as the design methodology of the PCU traction converter. Experimental results demonstrate that both the PCU devices and the converter exhibit excellent performance, reliable operation, and full compliance with the overall design and application requirements.

Keywords: power converter unit; double-deck EMU; integrated main/auxiliary system; traction converter; high-speed EMU