

一体式整流斩波充电装置在智能轨道快运系统的应用

唐兆军¹ 傅俊武¹ 李松柏¹ 王绍勇² 郭志奇² 沈松伟²

(1. 杭州市地铁集团有限责任公司, 310003, 杭州; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100038, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的:为满足智能轨道快运系统大功率充电需求,提出一种智能轨道快运系统充电装置的新型结构,其能满足在一体化智能箱式充电站内的安装,避免在乘客站台安装带来的噪声和接口等问题。**方法**:智能轨道快运系统快速充电装置结构包括输入侧交流断路器、预充电回路、网侧滤波回路、PWM(脉冲宽度调制)整流回路、Buck 直流变换回路和直流侧滤波回路;PWM 整流实现交流到直流功率变换;直流 Buck 变换实现直流电压输出满足智能轨道快运系统车载储能元件充电的恒压、恒流及恒功率的充电模式;预充电电路减少系统工作时的合闸冲击;网侧滤波减少了注入电网的谐波电流;直流侧滤波采用电感 L 和电容 C 组成低通滤波器来滤除高频分量输出,减少纹波电流输出到储能介质。**结果及结论**:通过仿真、选型计算的充电装置采用双环控制提高了系统的动态性能,有源阻尼技术有效抑制了谐振,正反转双序锁相环实现了网侧适应性控制、系统控制及保护对 Buck 和 PWM 整流进行控制,实现输出的恒压及限流控制。充电装置已经成功应用于株洲智轨一期工程项目,项目通车验证了充电装置能够安全、高效地给智能轨道快运系统车辆充电。

关键词 智能轨道快运系统;充电装置;脉宽调制四象限整流;直流 Buck 斩波

中图分类号 U239.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.038

Application of Integrated Rectifier Converter Charging Device in Autonomous Rail Rapid Transit

TANG Zhaojun, FU Junwu, LI Songbai, WANG Shaoyong, GUO Zhiqi, SHENG Songwei

Abstract Objective: To meet the ART (autonomous rapid rail transit) system large-power charging needs, a new structure for ART charging device is proposed, which can be installed within an integrated intelligent box-type charging station, avoiding noise and interface problems caused by the installation at passenger platform. Method: The system structure of the ART fast charging device includes input-side AC circuit interrupter, pre-charge circuit, network-side filtering circuit,

PWM (pulse width modulation) rectifier circuit, Buck DC (direct current) conversion circuit and DC-side filtering circuit; PWM rectifier realizes AC to DC power conversion; DC Buck conversion realizes DC voltage output meeting the ART on-board energy storage component charging mode of constant voltage, constant current and constant power; pre-charge circuit reduces the closing striking during system operation; network-side filtering reduces the harmonic current flowing into the power grid; DC-side filtering uses inductance L and capacitance C to constitute a low-pass filter to filter out the output high-frequency component and reduce the output ripple current to the energy storage medium. Result & Conclusion: Through simulation and type selection calculation, the charging device uses dual-loop control to improve system dynamic performance, the active damping technology to effectively suppress resonance, the forward and reverse rotation dual-phase locked-loop to realize grid-side adaptive control, system control and protection to manage Buck and PWM rectifier, and ultimately achieves constant voltage and current limitation control. The charging device is successfully applied in Zhuzhou ART phase I project, project vehicle launch verifies that the charging device can safely and efficiently charge ART vehicles.

Key words ART; charging device; PWM four-quadrant rectification; DC Buck converter

First-author's address Hangzhou Metro Group Co., Ltd., 310003, Hangzhou, China

0 引言

智能轨道快运系统(以下简称“智轨系统”)是一个集自主导向、轨迹跟随、全电驱动和智能化驾驶等功能为一体的安全、高效、绿色的中运量轨道交通新制式。中国城市轨道交通协会颁布的 T/CAMET 00001—2020《城市轨道交通分类》标准中明确智能轨道交通按分类要素中的系统制式分属城市轨道交通第十类“电子导向胶轮系统”^[1]。

智轨系统可作为大城市大运量轨道交通的补充、加密及接驳线,亦可作为中小城市特殊区域的走廊客运骨干线以及旅游观光公共交通线。

智轨车辆整列车配置大容量锂离子储能电池,车辆续航能力极高且充电速度快。线路沿线每座车站无需设置大量的充电变电站,仅需在始发站及中间补充车站设置充电变电站,整个系统的供电成本将大幅降低。由此,智轨系统的供电系统及充电变电站已发生深刻转变,一体化智能箱式变电站及一体式整流与斩波充电装置是智轨系统供电的发展方向。

本文重点介绍了一体式模块化设计的整流与斩波充电装置,其采用四象限整流与直流 Buck 斩波结合的设计方案,满足了在一体化智能箱式充电站内安装的要求。

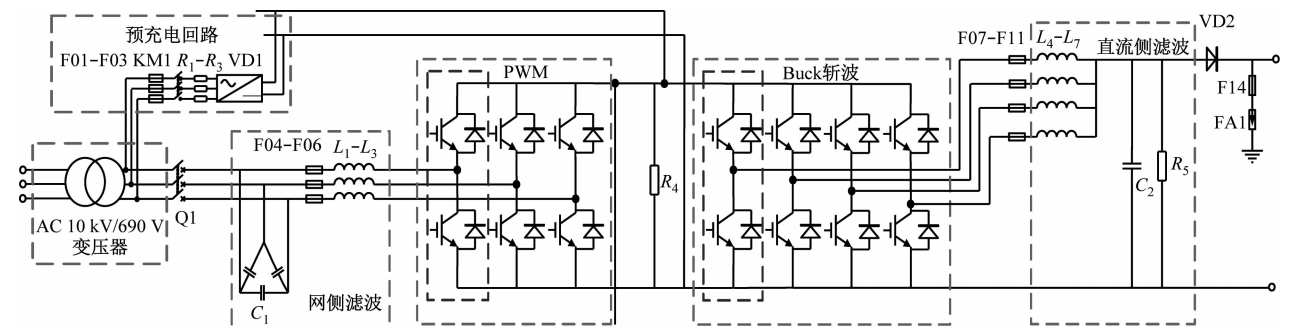
智能化、紧凑型、方便扩展的整流变换是储能型有轨电车及智轨系统充电变电站的核心。虽然传统的二极管整流单元具有效率高、技术成熟和成本低的优势,但二极管整流自身没有开断保护能力,因而整流系统在设计时需设置直流开关设备以进行短路保护。另外,二极管整流桥由于二极管数量较多,且需设置阻容吸收、熔断器和压仓电阻等,使得整流器柜体积较大。传统二极管整流或脉波整流带来的谐波污染对国家电力网系统的影响需

额外治理。我国在采用传统二极管整流的储能式充电箱式变电站的工程中,在不包含直流充电装置的情况下,充电箱式变电站的长度为 16 m 以上。直流充电装置需安装在乘客站台,其安装基础、接口和电缆敷设等将导致工程量增加,更重要的是充电时的设备噪声、户外安装时的安全影响和给乘客带来的乘车体验与心理不适感等,会导致乘客投诉量增多。

本次株洲智轨一期工程设计提出的一体式模块化 PWM(脉冲宽度调制)整流与斩波充电装置,安装在一体化智能充电箱式变电站内,充电箱式变电站长度仅为 10 m,节省空间,易于扩展,方便维护,具有标准化的工程推广价值。

1 智轨系统快速充电装置设计

智轨系统快速充电装置结构包括输入侧交流断路器、预充电回路、网侧滤波回路、PWM 整流回路、Buck 直流变换回路和直流侧滤波回路等,装置结构图如图 1 所示。多绕组牵引变压器设置在充电装置前端,以实现充电装置与网侧隔离;上下行充电装置回路之间的相互隔离,可保障充电时操作人员及车厢人员的安全;同时还负责给充电箱变电站及乘客站台提供动力用电。



注:AC—交流电;KM—直流感触器;C—电容;R—电阻;F—熔断器;VD—二极管;Q—断路器;L—电感;FA—避雷器。

图 1 充电装置整体设计方案

Fig. 1 Overall design scheme of charging device

多绕组牵引变压器变比选择为 10.00 kV/0.69 kV 或 0.69 kV/0.40 kV。基于 PWM 整流 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)模块的选型,在较低的电压等级下,难以选择额定电流较高的 IGBT 模块,这不利于 IGBT 模块输出较高功率,而需要适配更多模块来完成额定输出。因此,其在成本控制和功率调节

上均不具备可实施性。在交流电压较高的情况下,交流电流相应较小,有更高的冗余度,在 IGBT 选型上有更多的选择。当然,交流电压也不能太高,过高的交流电压会导致 PWM 整流直流母线电压升高,会影响 IGBT 工作安全性。经综合考虑,基于风电变流器成熟经验,选择 690 V 作为变压器二次侧

电压,IGBT 选择额定耐压为 1 700 V 的功率模块。

1.1 PWM 整流

PWM 整流实现交流到直流功率变换,输入为交流 690 V,将输出直流母线电压控制为恒压 1 050 V。

1) IGBT 模块。根据 Infineon(英飞凌)公司推荐的电压选择表及工作电流,选择额定电压 1 700 V/1 000 A 的 PrimePACK™3 个模块,带有温度检测的 NTC(热敏电阻),A、B、C 三相共 3 组功率组件。利用 Infineon 在线仿真软件进行损耗仿真和散热器热仿真,如图 2 所示。由图 2 可知,在风速 7.5 m/s 时,散热器表面温升 58.9 ℃,满足实际工况要求。系统的功率模块损耗仿真结果如表 1 所示。

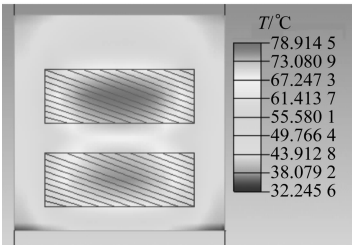


图2 功率模块热仿真结果截图

Fig. 2 Screenshot of thermal simulation results of power module

表1 功率模块损耗仿真结果

Tab.1 Simulation results of power module loss

开关部分的损耗/W		导通部分的损耗/W		总损耗/W	
开关转换	功率模块	开关转换	功率模块	开关转换	功率模块
1 010.9	401.8	722.3	104.9	1 733.2	506.7

注:开关转换最大结温为 137.5 ℃;功率模块最大结温为 114 ℃;固定散热器温度为 80 ℃。

2) 复合母排。其设计是利用较小的空间实现大电流、高电压元器件之间的连接,提高设备可靠性和质量,降低杂散电感,降低尖峰电压,以保护 IGBT 器件;使用叠层母排,高强度整体粘结以保证长期不松动,同等电流下可以使铜排尽量减薄,用弹性来补偿振动的影响,全密闭结构可防止潮气渗入,绝缘材料封装消除了爬电击穿的威胁。

3) IGBT 驱动器。其与控制器之间采用光纤传输信号,驱动具有短路保护功能,当短路故障出现,驱动器响应时间不超过 10 μs。IGBT 过电流保护由控制器检测回路电流测量实现,硬件和软件保护门限可根据需要作调整。

1.2 直流 Buck 变换

直流 Buck 变换实现直流电压输出以满足智轨

车载储能元件充电的恒压、恒流及恒功率的充电模式。为减小输出电压及电流纹波,以提高电能质量、延长储能介质寿命,采用 4 相交错并联技术,单个回路电流为 300 A。直流 Buck 斩波变换同样可以选择额定电压 1 700 V/1 000 A 的 PrimePACK™3 模块,此处不再赘述,但需对其支撑电容进行选型。

根据智轨系统充电装置性能指标要求,直流电压为 750 V,开关频率为 1 kHz,纹波电压波动范围为 ±3%,工作温度 -20 ℃ ~ +55 ℃。对于单个功率单元,平均输出电流为 300 A,最大输出电压为 DC 750 V,计算得到单个功率单元电容值为 1 500 μF,电容电流最大值为 150 A,单个功率单元选用 4 个 390 μF/41 A/DC 900 V 薄膜电容并联。

1.3 预充电回路

直流母线电容初始电压为 0,系统工作时若直接合闸 690 V 交流开关则会引起冲击电流,影响电容工作寿命,故设计预充电回路。系统启动时,先合预充电开关,通过预充电电阻限制预充电电流,直至母线电容到一定电压值,断开预充电开关,再合主回路开关。

1.4 网侧滤波

为减少注入电网谐波电流,网侧设计 LCL(电感-电容-电感)滤波回路,其中电网侧 L 充分利用变压器漏感来实现。LCL 滤波相对单 L 滤波,可将电感器体积大幅缩小,在同样的电感值或体积下,滤波效果可明显提高。根据仿真计算,选择滤波电抗器为 280 μH/800 A、滤波电容为 AC 850 V-3 × 55.7 μF。

1.5 直流侧滤波

在 Buck 电路中,电感器和电容器组成低通滤波器,滤除输出高频分量,减少输出纹波电流到储能介质。

1) 输出滤波电抗器。其选取主要影响输出纹波电流,同时受质量、体积、成本和发热量的制约。设计的纹波电流峰值系数要求小于 3%,计算得到 L 最小取 1.3 mH,实际选取 2 mH。

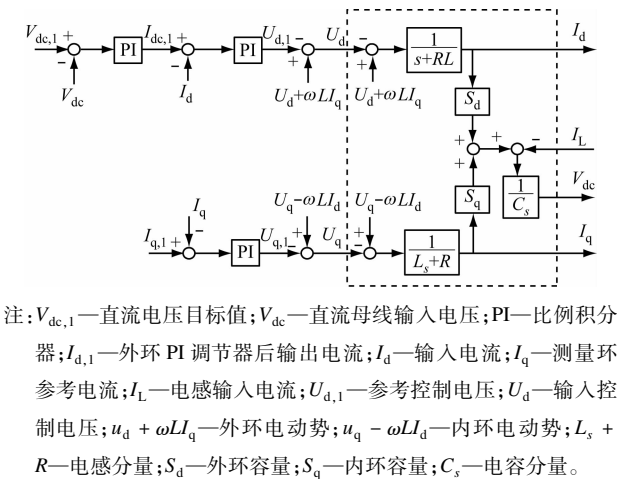
2) 输出滤波电容。滤波电容一方面是配合电感进行滤波,另一方面是在输出储能电池切除的时候能够承载电感中能量。储能电池容量足够大,所以谐波对其电压影响很小,这里主要考虑在输出切除时电感中能量对滤波电容的冲击而引起电容的升压。考虑极限情况,切除时输出电流为 1 200 A,

单个模块切除电流 300 A, 单个功率单元电感 2 mH, 计算得到电容值为 830 μ F, 实际选择 2 只 1 100 V/420 μ F 薄膜电容并联。

2 充电装置技术特征

2.1 双环控制技术

当充电装置并网运行时, 根据充电要求进行大功率快速充电。网侧为保证快速连续调节输出有功功率和无功功率, 并实现有功、无功解耦控制, 采用直流电压外环、交流电流内环的双环控制, 以提高系统的动态性能和实现限流保护。双环控制原理如图 3。



注: $V_{dc,1}$ —直流电压目标值; V_{dc} —直流母线输入电压; PI—比例积分器; $I_{dc,1}$ —外环 PI 调节器后输出电流; I_d —输入电流; I_q —测量环参考电流; I_L —电感输入电流; $U_{d,1}$ —参考控制电压; U_d —输入控制电压; $u_d + \omega LI_q$ —外环电势; $u_q - \omega LI_d$ —内环电势; $L_s + R$ —电感分量; S_d —外环容量; S_q —内环容量; C_s —电容分量。

图 3 双环控制原理图

Fig. 3 Diagram of dual-loop control

2.2 有源阻尼技术

针对变流器的谐振问题, 从离散控制的角度分析谐振机理, 即控制器运算时间带来的滞后影响了系统的相频特性, 使其不满足奈奎斯特稳定判据而失稳。虚拟电阻法是解决谐振问题的一种有效而稳定的方法, 但在工业应用中存在电容电流欠采样导致的混叠问题。选择合理的滤波器可解决混叠问题, 但其带来的相位滞后影响了阻尼效果, 甚至为系统带来负阻尼。针对这一问题, 可采用带超前补偿的虚拟电阻有源阻尼法。

通过改变滤波电容并联组数的方法来调整 LCL 谐振频率, 进行谐振频率在 750 ~ 1 230 Hz 范围的有源阻尼试验, 可有效抑制谐振。有源阻尼原理如图 1 所示的网侧滤波。

根据仿真波形在有源阻尼投入以后, 谐振分量明显消除。仿真效果图见图 4。

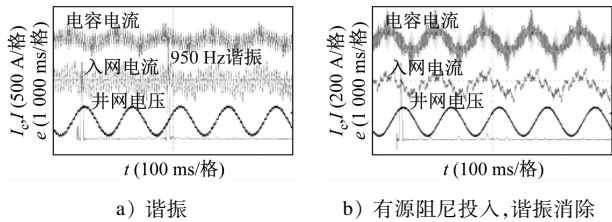


图 4 仿真效果截图

Fig. 4 Screenshot of simulation effect

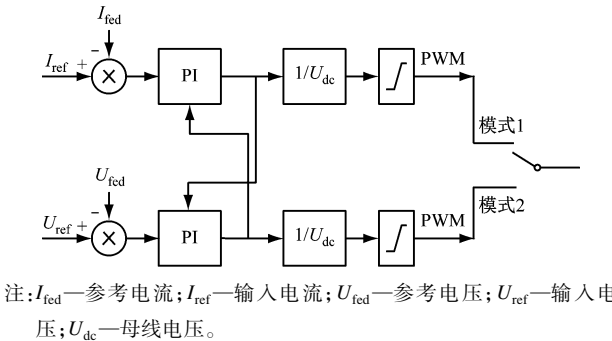
2.3 电网适应性控制技术

基于轨道交通充电可靠性要求, 同时考虑到实际电网供电质量, 要求充电装置及充电系统具备电网适应能力。

本装置使用比例积分谐振控制技术, 以实现网侧不平衡度在 15% 以内的可靠稳定运行。采用有源阻尼技术, 以达到抑制谐波目的; 采用正反转双序锁相环技术, 与常规锁相技术相比, 在故障过程与异常工况时, 它可以快速、准确地检测电网相位, 以实现稳定的矢量控制。

2.4 多模式控制技术

DC/DC(直流变流器) 充电控制包括恒流限压和恒压限流等模式。模式 1 为恒流限压, 恒流充电控制采用直流电流 PI 极化指数控制, 维持充电电流的恒定, 电流给定值为负载允许的充电电流, 电流反馈值由测量元件直接测得充电电流; 模式 2 为恒压限流, 恒压充电控制采用充电电压 PI 调节, 维持负载电压的恒定, 电压给定值为负载允许的电压值, 电压反馈值由测量元件直接测得负载电压。多模式控制原理见图 5。



注: I_{fed} —参考电流; I_{ref} —输入电流; U_{fed} —参考电压; U_{ref} —输入电压; U_{dc} —母线电压。

图 5 多模式控制原理

Fig. 5 Multi-mode control principle

2.5 主动均流控制技术

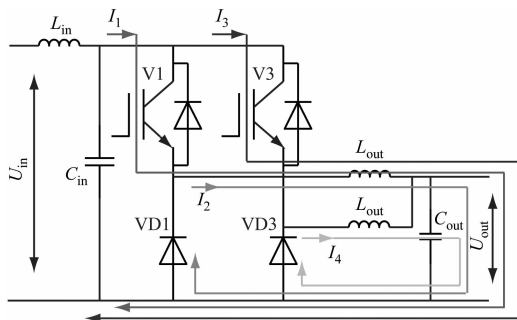
对储能装置充电时, 充电电流纹波较大时会使得储能装置发热, 使用寿命受到了巨大威胁。采用多回路交错并联数字主动均流控制技术(见图 6),

对多个支路电流进行动态均流,在相同的输出条件下可有效地减小单相滤波电感的体积,单相开关管的电流仅仅是输出电流的 N (正整数) 分之一,开关频率降低为原来的 N 分之一,还可以降低变换器的电磁干扰、有效改善动态性能。

交错并联技术将变换器在各单元中进行合理的热损耗分配,可提高单元的可靠性,提高功率密度、降低成本,同时方便变换器的维修和维护,提高了系统容错性和运行可靠性。

3 系统控制及保护

整个充电装置的核心是根据系统输出的电压及电流,进行 Buck 电路的 PWM 控制,以实现输出的恒压及限流控制。控制系统如图 7 所示。



注: L_{in} —输入端电感; U_{in} —输入端电压; C_{in} —输入端电容; VD—续流二极管; V—绝缘栅双极型晶体管; I —输入端电流; L_{out} —输出端电感; U_{out} —输出端电压; C_{out} —输出端电容。

图 6 主动均流控制

Fig. 6 Active current sharing control

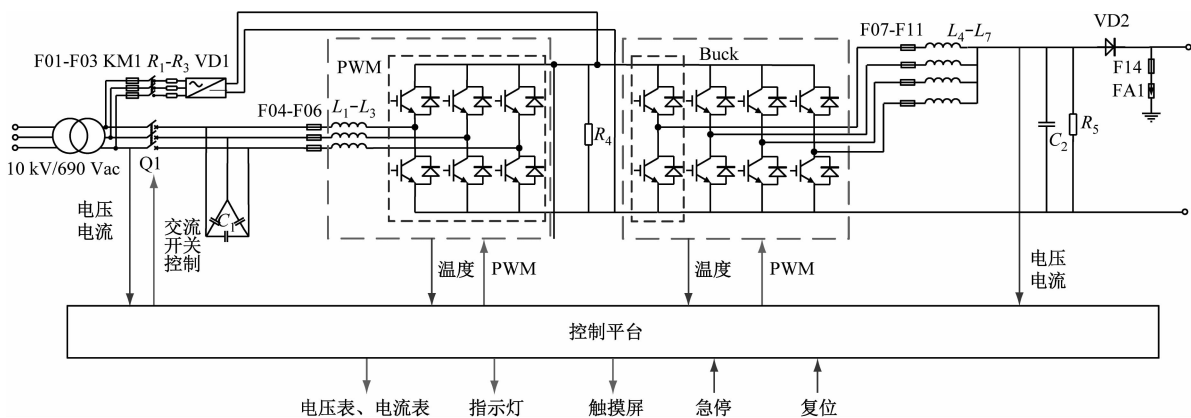


图 7 控制系统图

Fig. 7 Diagram of control system

交流侧电压电流采样、直流输出侧电压电流采样、模块温度采样,主要用于系统的保护控制。系统设计有开入急停、复位按钮、开出指示灯及触摸屏人机显示等。对于充电装置的保护分为硬件保护和软件保护,其中硬件保护包括核心 IGBT 模块级的保护和应用层采样保护;软件保护是根据充电装置运行过程中的电量信息、通信报文信息和开关量信息对设备进行诊断和保护处理。

1) 输入、输出电压电流故障。充电装置系统具备输入欠压、过压、过流保护,输出过压、过流软件保护,在系统输入、输出侧设置快熔保护,在输出侧设置 chopper 装置硬件过压保护。这就能够为充电装置本体、充电装置至充电轨之间电气故障和异常运行方式提供有效的保护功能。

2) 通信故障保护。通信故障包括内部通信故障、外部通信故障等;发生故障后系统立即停止功

率输出,断开主接触器,停机等待。

3) 过热故障保护。过热故障包括电抗器过热、IGBT 过热、柜体过热故障等。当温度达到设定值时,控制器发出告警信号,如果告警得到妥善处理,将不会发生故障;若告警未得到处理,一段时间后,进入故障状态。发生故障后,系统立即停止功率输出,断开主接触器,停机等待。

4) 急停故障保护。急停按钮用于在设备紧急停机时使用,在急停触发后充电装置的相应动作为停止输出、分断主接触器,停机等待。

5) 系统故障保护。故障信号开入控制器,系统故障逻辑如图 8 所示。

6) 接地保护。充电装置系统设置接地保护装置,发生故障后,系统立即停止输出,断开主接触器,停机等待。

7) 报警保护。装置与外部连接的所有报警、跳

闸信号均采用接点方式。

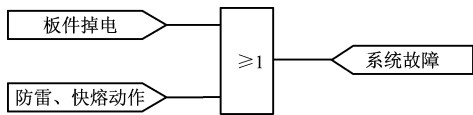


图8 系统故障逻辑

Fig. 8 System failure logic

4 结语

智轨系统是一种多元城市交通解决方案的交通新制式,是城市轨道交通毛细血管的组成部份。智轨系统车载磷酸铁锂电池储能,车辆续航能力极高且充电速度快。其充电变电站的供电系统已发生深刻转变,一体化整流与斩波大功率充电变流装置是充电变电站的发展方向。

本文介绍了智轨系统大功率充电变流装置的系统结构,选择适配单牵引变压器的 PWM 整流和 Buck 斩波调压技术路线,充分应用变流器矢量控制技术,形成一体式模块化充电站技术方案。设计的大功率充电变流装置具有双环控制技术、有源阻尼技术、电网适应性控制技术、多模式控制技术及主动均流控制技术,通过系统保护实现输出的恒压及限流控制,满足智轨车辆大功率快速充电需求。采用四象限整流与直流 Buck 斩波的一体式模块化设计满足一体化智能箱式充电站内安装,避免在乘客站台安装带来的噪声和接口问题。整体方案减少了整流机组数量,提升了能量转换效率;提升了续流回路冗余度,并使功能单元模块化,方便扩展;能

(上接第 204 页)

参考文献

- [1] 张庆娟. 城市轨道交通成本构成分析: 以北京地铁四号线为例[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
ZHANG Qingjuan. The analysis on cost of urban rail transit—with example of Beijing Subway Line 4[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [2] 朱效洁, 王志海. 轨道交通运营体系中车务人员标准配置研究[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(7): 31.
ZHU Xiaojie, WANG Zhihai. On standardized allocation of rail transit operational staff [J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(7): 31.
- [3] 张琦. 城市轨道交通乘务管理与驾驶员配属关系研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 59.
ZHANG Qi. Relationship between crew team management and

精简设备数量,降低整体投资成本。该充电变流装置已成功应用于株洲智轨一期工程中,具有极好的应用推广价值。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通分类: T/CAMET 00001—2020 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2020.
China Association of Metros. Classification of urban rail transit: T/CAMET 00001—2020 [S]. Beijing: China Railway Publish House, 2020.
- [2] 北京城建设计发展集团股份有限公司. 株洲市智能轨道交通一期工程初步设计 [Z]. 北京: 北京城建设计发展集团股份有限公司, 2020.
Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd. Preliminary design of Zhuzhou Intelligent Rail Transit phase I project [Z]. Beijing: Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., 2020.
- [3] 北京城建设计发展集团股份有限公司. 株洲市智能轨道交通一期工程招标用户需求书 [Z]. 北京: 北京城建设计发展集团股份有限公司, 2020.
Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd. User requirements specification for Zhuzhou Intelligent Rail Transit phase I project bidding [Z]. Beijing: Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., 2020.
- [4] 北京城建设计发展集团股份有限公司. 株洲市智能轨道交通一期工程施工图设计 [Z]. 北京: 北京城建设计发展集团股份有限公司, 2020.
Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd. Construction drawing design of Zhuzhou Intelligent Rail Transit phase I project [Z]. Beijing: Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., 2020.

(收稿日期: 2021-02-23)

staffing in urban rail transit [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(5): 59.

- [4] 杨鸣. 城市轨道交通设计中工务维修定员及机具配备计算标准的探讨[J]. 铁道标准设计, 2007, 51(1): 29.
YANG Ming. Discussion on the calculation standard of maintenance personnel and equipment allocation in urban rail transit design [J]. Railway Standard Design, 2007, 51(1): 29.
- [5] 吴艳艳. 呼和浩特市地铁 1 号线人员配置研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
WU Yanyan. Research on staffing configuration of Metro Line 1 in Hohhot City [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2018.
- [6] RUTHERFORD A W. Organizational evolution I-595 Port Everglades Expressway [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1989, 115(3): 357.

(收稿日期: 2021-01-28)