

基于混合碳化硅器件的城市轨道交通 车辆牵引节能研究

万 金¹ 施浚珲² 戴 琦²

(1. 西安中车永电捷通电气有限公司, 710016, 西安;

2. 上海地铁维护保障有限公司车辆分公司, 200235, 上海//第一作者, 工程师)

摘 要 以碳化硅为代表的新一代半导体器件在城市轨道交通车辆中的应用对车辆牵引电传动系统技术的发展意义重大。将混合碳化硅器件应用于城市轨道交通车辆牵引系统中,能极大地发挥碳化硅器件高温、高频和低损耗的特点,提高车辆牵引系统效率,实现牵引系统的节能降耗目标。与硅功率器件的电机损耗相对比,混合碳化硅功率器件的电机损耗可降低4%;通过更换功率器件、配套新型牵引控制单元,以及采用新的PWM(脉冲宽度调制)控制算法,降低了功率器件的开关损耗和导通损耗。在此基础上,优化了碳化硅功率器件的控制算法,以抑制电流谐波、降低电机损耗。软件仿真和装车测试结果验证了该混合碳化硅器件在车辆牵引系统中的节能效果。

关键词 城市轨道交通车辆;牵引节能;混合碳化硅器件;牵引逆变器;节能控制算法

中图分类号 U260.13; TM464

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.048

Research on Traction Energy-saving of Urban Rail Transit Vehicle Based on Hybrid Silicon Carbide Devices

WAN Jin, SHI Junhui, DAI Qi

Abstract Application of new generation semiconductor devices represented by silicon carbide in urban rail transit vehicle is of great significance to the development of vehicle traction electric drive system technology. The application of hybrid silicon carbide devices in urban rail transit vehicle traction system can greatly exert the characteristics of high temperature, high frequency and low loss of silicon carbide devices, improving the efficiency of vehicle traction system, achieving the goal of energy saving and consumption reduction of traction system. Compared to the motor loss of silicon power devices, the motor loss of hybrid silicon carbide power devices can be reduced by 4%; by replacing power components, supporting new traction control units and adopting a new PWM (pulse width modulation) control algorithm, both switching loss and conduction

loss of power devices are reduced. On this basis, the control algorithm of silicon carbide power devices is optimized to suppress current harmonic wave and to reduce motor loss. The results of software simulation and loading test have verified the energy-saving effect of the hybrid silicon carbide device adopted in vehicle traction system.

Key words urban rail transit vehicle; traction energy-saving; hybrid silicon carbide device; traction inverter; energy-saving control algorithm

First-author's address CRRC Xi'an Yongejietong Electric Co., Ltd., 710016, Xi'an, China

目前,在城市轨道交通中广泛应用的牵引变流器主要采用基于硅材料的IGBT(绝缘栅双极型晶体管)功率器件。随着中高压IGBT的问世及交流传动控制技术的发展成熟,IGBT逆变器实现了车辆的牵引变流,在轨道交通车辆牵引系统中得到了广泛的采用,并占据了市场的主导地位。但是,IGBT器件的性能已趋近于硅材料的性能极限,以及轨道交通行业的特殊应用环境和车辆对节能要求进一步提高等因素,限制了牵引变流器向高效、高功率密度方向的发展。

碳化硅等新型半导体材料的出现,为上述问题提供了解决方案,也为下一代碳化硅牵引变流器的研制提供了方向。与传统硅材料器件相比,碳化硅作为半导体材料具有优异的性能,尤其是应用于对功率进行转换和控制的元器件时,其在击穿场强、禁带宽度、电子饱和速度、熔点及热导率方面均具有优势,可满足低导通电阻、开关频率高和耐高温高压等工作要求。

牵引系统是车辆最主要的用电负载,碳化硅为代表的新一代半导体器件在城市轨道交通车辆中的应用,对牵引电传动系统技术的发展有重要意

义。本文以混合碳化硅器件为研究对象,研究并验证混合碳化硅器件在车辆牵引系统中的节能效果。

1 混合碳化硅器件的应用分析

本文研究的牵引变流器混合碳化硅器件将原 IGBT 内部反向并联的二极管替换为基于碳化硅材料的肖特基二极管 (SiC-SBD), 而原 IGBT 仍沿用硅材料。图 1 为混合碳化硅模块封装外形及替换二极管的示例图。

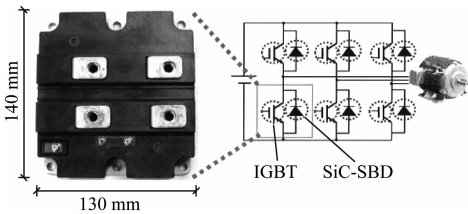


图 1 混合碳化硅 IGBT 模块的外形及在主电路中的位置
Fig.1 Mix silicon carbide IGBT module shape and its position in main circuit

二极管的电力损失主要包括开关损失和导通损失两部分。本文对采用传统硅材料二极管和采用碳化硅材料二极管的开关损耗和导通损耗进行对比分析。

1) 开关损耗对比。和传统硅二极管相比,碳化硅二极管具有反向恢复电流接近 0、器件热阻低及耐受结温高等优势。采用碳化硅器件,二极管的开关损耗可减小很多。

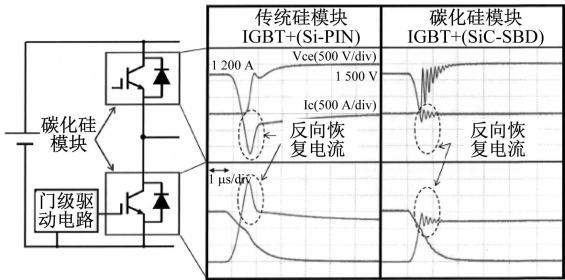
2) 导通损耗对比。碳化硅的绝缘破坏电场是硅的 10 倍,其导通电阻与硅相比也更低,这使得碳化硅二极管的导通损耗低于硅二极管。

两种二极管电能损耗对比结果如图 2 所示。由图 2 可知:采用碳化硅模块的二极管可减小反向恢复电流峰值;碳化硅二极管从开关损耗和导通损耗方面均优于普通硅二极管,可为牵引变流器的节能研究提供硬件支撑。

2 牵引变流器电机损耗对比分析

2.1 硅器件和碳化硅器件的电机损耗对比

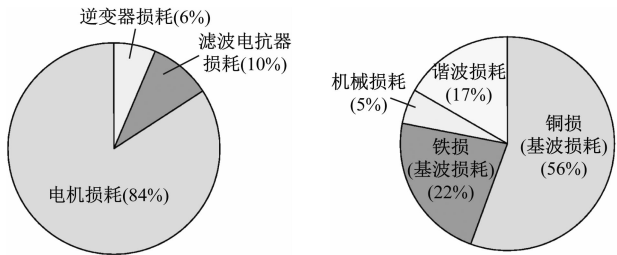
图 3 a) 为牵引变流器主电路损耗的分类占比,可以看出:在主要电气品中,电机损耗比例最大 (84%), 因此降低电机损耗十分重要。进一步对引发电机损耗的原因进行分析,如图 3 b) 所示,在电机损耗中,除了铜、铁等材料损耗外,因变流器的



注:Si-PIN 为硅光二极管。

图 2 采用传统硅模块和碳化硅模块的二极管电能损失对比截图

Fig. 2 Screenshot of diode power loss comparison between conventional silicon module and silicon carbide module



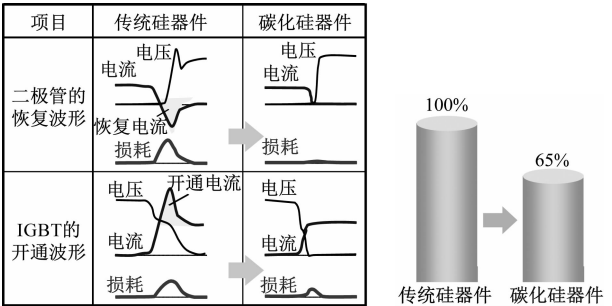
a) 引起主电路损耗的类型及占比 b) 引起电机损耗的类型及占比

图 3 轨道交通车辆牵引变流器的主电路损耗和电机损耗分类占比

Fig. 3 Categorical proportion of main circuit loss and motor loss of rail transit vehicle traction converters

脉宽调制控制产生的谐波损耗占 17%。因谐波损失引起的电机损耗可通过优化脉宽调制算法予以减小。

如图 4 所示,本文针对传统硅器件二极管与碳化硅器件二极管,分别对比了这两种模块的二极管恢复波形和 IGBT 开通波形,并对比了二者的功率单元损耗。由图 4 可知,与传统硅器件模块二极管



a) 器件波形对比 b) 功率单元损耗对比

图 4 传统硅器件和碳化硅器件的波形及功率单元损耗对比

Fig. 4 Comparison of waveform and power unit loss between conventional silicon devices and silicon carbide devices

相比,碳化硅器件模块二极管的损耗降低效果显著:恢复损耗可减小至传统硅器件恢复损耗的1/10;IGBT 开通损耗可减小至传统硅器件恢复损耗的1/2;功率单元损耗可减小至传统硅器件的65%。

2.2 传统脉宽控制及基于碳化硅节能控制的电机损耗对比

由于混合碳化硅器件具有工作频率高的优点,对牵引变流器功率模块的脉宽调制控制策略进行优化,可充分发挥碳化硅器件的优势,进一步实现城市轨道交通车辆的牵引节能。图5将传统脉宽调制控制(以下简称“传统控制”)、与碳化硅模块配套的新型节能控制(以下简称“节能控制”)两种工况下的电机电流波形进行对比。由图5可看出,与传统脉宽控制相比,节能控制下电流谐波有所减小,电机损耗降低了4%。

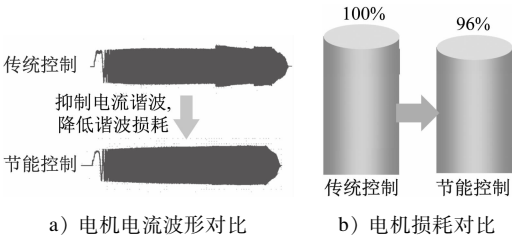


图5 传统脉宽控制、节能控制下电机电流波形和电机损耗对比

Fig. 5 Comparison of motor current waveform and motor loss under conventional pulse width control and energy-saving control

综上所述,从碳化硅器件自身损耗低的特性及优化牵引变流器控制算法两方面着手,可最大程度地减少牵引变流器的电机损耗,实现牵引变流器节能的目标。

3 混合碳化硅牵引变流器设计方案

混合碳化硅牵引变流器设计时,由6个混合碳化硅器件组成1个三相逆变单元,并采用1台牵引变流器驱动4台牵引电动机的工作方式。该牵引变流器的主电路采用两电平的电压型直-交逆变电路。列车通过高压回路将DC 1 500 V直流电供给牵引逆变器,经牵引变流器变换成频率和电压均可调的三相交流电后,再向异步牵引电动机供电。

牵引主电路主要由滤波电路、充放电电路、逆变单元、斩波单元、检测元件及牵引电动机等设备组成,其中,将斩波单元与三相逆变单元集成在一起共同组成功率单元。当电网电压在1 000 ~ 1 800

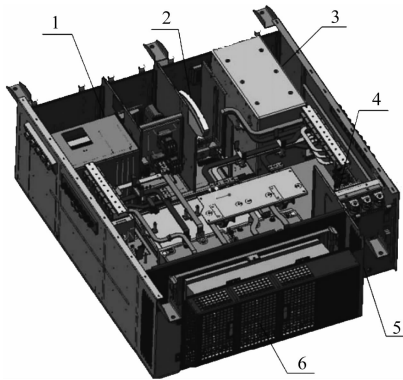
V内波动时,主电路均能正常工作,并可方便地实现列车牵引和制动的无节点转换。该功率单元选用的混合碳化硅功率器件型号为MBN1800F33F-C3,规格为3 300 V/1 800 A,厂家为日立,采用软门极控制,具有低功耗、高性能、低噪声、高耐热疲劳性等特点。其技术参数如表1所示。

表1 混合碳化硅功率器件的技术参数

Tab. 1 Technical parameters of hybrid silicon carbide power devices

参数符号	参数名称	参数值
VCES	集电极电压/V	3 300
VGES	门极电压/V	± 20
IC	集电极额定电流/A	1 800
ICp	集电极电流瞬时峰值/A	3 600
IF	正向额定电流/A	1 800
IFM	正向电流瞬时峰值/A	3 600
Tj	结温/℃	- 40 ~ 150
Tstg	存储温度/℃	- 50 ~ 125
VISO	隔离电压/V	6 000

图6为碳化硅牵引变流器的三维结构示意图。该牵引变流器具有以下结构特点:①由牵引变流器箱体、高压电路和低压控制电路组成,安装在车辆下方,安装方式为托装;②分为开放室和密闭室两部分,变流器所需的大量散热设备经绝缘处理后安装在开放室内,使其自然冷却,而对防尘要求较高的零部件则安装在密闭室内;③混合碳化硅模块安装在密闭室内,其冷却采用热管散热器,通过散热基板和热管散热器(内含冷媒)将热量散发到车辆侧的通风部分。



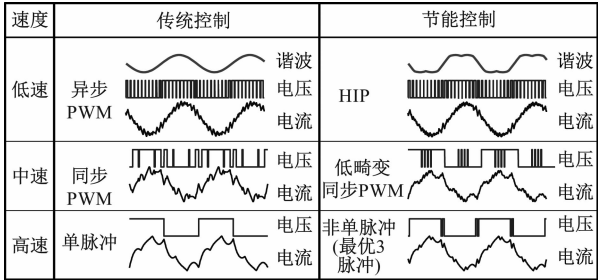
注:1——牵引控制单元;2——线路接触器;3——高速断路器;4——预充电回路;5——放电电阻;6——功率模块。

图6 碳化硅牵引变流器的三维结构示意图

Fig. 6 Diagram of silicon carbide traction converter three-dimensional structure

4 混合碳化硅器件的控制算法优化

为减少功率器件的开关损耗和导通损耗抑制电流谐波,应对碳化硅功率器件的配套控制算法进行优化。根据不同的列车运行速度等级,在传统控制和节能控制下分别采用了3种不同的PWM(脉冲宽度调制)控制算法,如图7所示。由图7可知,与传统控制相比,节能控制对算法进行了优化,该优化控制算法也可用于硅器件,但用于硅器件时,其电机损耗会有所增加。



注:设 v 为列车运行速度,低速指 $v \leq 20$ km/h,中速指 20 km/h $< v < 60$ km/h,高速指 $v \geq 60$ km/h;HIP——马鞍波脉宽调制。

图7 3种速度等级下节能控制算法较传统控制的优化
Fig.7 Optimization of energy-saving control algorithm compared with conventional control at three speed levels

- 1) 在低速阶段,用HIP代替异步PWM,以获得更高的直流母线电压利用率,此时的电流正弦度更高,电流谐波损耗更少。
- 2) 在中速阶段,为应对优化的PWM控制,碳化硅牵引变流器安装了搭载高性能微处理器的新型无接点控制单元(型号为VL6),可以实现比以往更高速的PWM运算处理。相较于以往的同步PWM控制,新低畸变同步PWM在1个运算周期内可以得到更多的调制分段,减少电流畸变。
- 3) 在高速阶段,用最优同步3脉冲调制替代传统的单脉冲方波调制,这虽然会增加变流器的损耗,但由于采用的低损耗碳化硅模块可抑制变流器损耗的增加,可在保持变流器损耗不变的前提下对PWM控制算法进行优化,从而在很大程度上减小了电流谐波,减小了牵引电机的损耗。
- 以硅模块的同步单脉冲PWM控制算法为基准,采用最优同步3脉冲调制后,传统硅模块的损耗增加了51%,而碳化硅模块的损耗基本保持不变。

5 仿真计算与现车测试

5.1 仿真计算

本文选取上海轨道交通8号线(以下简称“8号线”)进行仿真节能测试,计算该线列车两种控制类型下每车公里的耗电量,其仿真计算结果如表2所示。由表2可计算得到,相较于硅变流器,碳化硅变流器耗电量减少了2.17%。

表2 两种控制类型下案例线路仿真节能对比
Tab.2 Comparison of case line simulation energy-saving under two control types

控制类型	单位牵引电量/ (kWh/ (车·km))	单位再生电量/ (kWh/ (车·km))	单位耗电量/ (kWh/ (车·km))
基于硅器件逆变器的传统控制	2.149	0.768	1.381
基于碳化硅逆变器的节能控制	2.127	0.776	1.351

5.2 样机测试

本文所研制的混合碳化硅牵引变流器如图8所示。根据IEC 61287-1:2014《轨道交通机车车辆用电力变流器 第1部分:特性和试验方法》进行相关试验,在实施混合碳化硅牵引变流器电气性能试验的同时,重点关注了逆变器温升、电磁兼容和冲击振动等试验项目及参数情况。样机试验结果表明:该混合碳化硅牵引变流器可以满足设计要求。

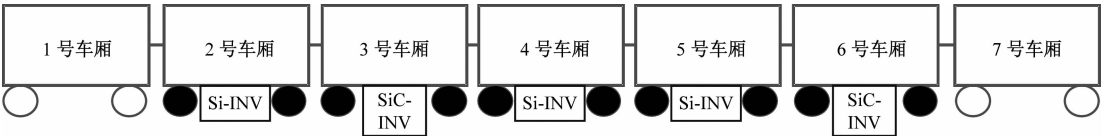


图8 混合碳化硅牵引变流器样机
Fig.8 Hybrid silicon carbide traction converter prototype

5.3 正线节能测试

为真实体现混合碳化硅牵引变流器的节能效果,本文选取8号线列车进行装车测试,该列车为5动2拖的7节编组形式。测试时采用混装方式,即在测试列车的2号车、4号车及5号车上各安装1台硅牵引变流器,在3号车和6号车上各安装1台混合碳化硅牵引变流器,如图9所示。

测试列车累计开行36 000 km,其能耗测试结果如表3所示。经计算,3台硅牵引变流器的平均能



注:Si-INV——硅牵引变流器;SiC-INV——碳化硅牵引变流器。

图9 测试列车的牵引变流器装车方案

Fig.9 Traction converter installation scheme of test train

表3 运行3 600 km 的列车能耗测试结果

Tab.3 Energy consumption test results of train with 3 600 km operation mileage

牵引变流器类型	车厢编号	牵引电量/ kWh	再生电量/ kWh	总耗电量/ kWh
硅牵引变流器	2 号车厢	111 691	58 868	52 823
	4 号车厢	109 399	54 955	54 444
	5 号车厢	110 722	56 437	54 285
混合碳化硅牵引变流器	3 号车厢	120 857	68 291	52 566
	6 号车厢	109 791	58 125	51 666

耗为53 851 kWh,2 台混合碳化硅牵引变流器的平均能耗为52 116 kWh,后者较前者节能3.22%。与仿真数据相比,正线实际运营中信号系统控制列车运行时,列车在牵引和制动模式间频繁切换,会造成更多的损耗,其碳化硅牵引变流器的节能效果将更为显著。

6 结语

本文提出的基于混合碳化硅器件的牵引节能研究,可为城市轨道交通车辆牵引系统的商业推广提供助力,带动相关产业链发展。该研究可进一步提高我国城市轨道交通的自主设计开发能力及技术产品水平,降低研发采购成本,降低牵引系统能耗,促进城市轨道交通领域的节能减排。

参考文献

[1] 关国华. SiC 功率器件在电力牵引系统的应用研究[J]. 现代城市轨道交通, 2018(8): 1.
GUAN Guohua. Research and application of SiC power device in traction system of electric locomotive[J]. Modern Urban Rail Transit, 2018(8): 1.

[2] 傅亚林, 徐锋, 张斌, 等. 以碳化硅功率模块及永磁电机为特征的新一代牵引系统研究[J]. 现代城市轨道交通, 2019(11): 33.
FU Yalin, XU Feng, ZHANG Bin, et al. Research on the new generation traction system characterized by silicon carbide power

module and permanent magnet motor[J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(11): 33.

[3] 张安, 田庆, 肖婵娟, 等. SiC 混合 IGBT 在下一代地铁列车中的应用研究[J]. 电力电子技术, 2017, 51(9): 37.
ZHANG An, TIAN Qing, XIAO Chanjuan, et al. Application research on SiC hybrid IGBT devices in the next generation subway train[J]. Power Electronics, 2017, 51(9): 37.

[4] 漆宇, 李彦涌, 胡家喜, 等. SiC 功率器件应用现状及发展趋势[J]. 大功率变流技术, 2016(5): 1.
QI Yu, LI Yanyong, HU Jiaxi, et al. Application status of SiC power device and its development tendency[J]. High Power Converter Technology, 2016(5): 1.

[5] 马保慧. 基于 Si 和 SiC 器件的逆变器系统性能对比研究[J]. 电气传动, 2017, 47(8): 3.
MA Baohui. Comparison analysis for inverter system based on Si and SiC power devices[J]. Electric Drive, 2017, 47(8): 3.

[6] 中口胜己, 彭惠民. 适应 DC 1500 V 供电制式的全碳化硅 VVVF 逆变器验证结果[J]. 国外铁道机车与动车, 2017(1): 38.
NAGAGUCHI Katsumi, PENG Huimin. Verification results of all silicon carbide VVVF inverter adapted to DC 1500 V power supply system[J]. Foreign Railway Locomotive and Motor Car, 2017(1): 38.

[7] 河村恒毅, 蔡千华. 采用全碳化硅元件的铁道车辆用高效辅助电路系统[J]. 国外铁道机车与动车, 2015(5): 12.
KAWAMURA Zuneyoshi, CAI Qianhua. Efficient auxiliary circuit system for railway vehicles using all silicon carbide components[J]. Foreign Railway Locomotive and Motor Car, 2015(5): 12.

[8] 郭晓燕, 张波, 黄金. 城铁列车牵引系统集成设计技术研究[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(3): 56.
GUO Xiaoyan, ZHANG Bo, HUANG Jin. Study on traction system integration technology of metro train[J]. Railway Locomotive & Car, 2013, 33(3): 56.

[9] 唐威, 忻力, 魏海山, 等. SiC 混合 IGBT 器件应用研究[J]. 大功率变流技术, 2015(2): 40.
TANG Wei, XIN Li, WEI Haishan, et al. Application research on SiC hybrid IGBT devices[J]. High Power Converter Technology, 2015(2): 40.

(收稿日期:2021-08-06)