

轨道交通列车碳化硅充电器件损耗计算方法

牛 闯

(中车长春轨道客车股份有限公司,130062,长春//高级工程师)

摘 要 第三代宽禁带半导体——碳化硅器件的广泛应用,使轨道交通列车充电机系统中器件的损耗计算逐渐成为列车电源系统设计中的一项目键技术。提出了一种碳化硅器件的损耗计算模型。基于 PLECS 软件进行了碳化硅器件的损耗仿真对比,验证了该损耗计算模型的合理性。对所研制的碳化硅充电机进行了功能验证,验证了碳化硅器件损耗计算模型在实际应用中的正确性。

关键词 轨道交通列车;碳化硅充电机;损耗计算

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.09.021

Loss Calculation Method of SiC Charger Device in Rail Transit Train

NIU Chuang

Abstract With the wide application of the third-generation wide band gap semiconductor-SiC (silicon carbide) device, loss calculation of device in rail transit train charger system has gradually become a key technology in the design of train power supply system. A loss calculation model of SiC device is proposed. Loss of SiC device is simulated and compared based on PLECS software, verifying the rationality of the loss calculation model. Functionality verification is carried out towards the developed SiC charger, validating the correctness of SiC device loss calculation model in actual practice.

Key words rail transit train; SiC charger; loss calculation

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

0 引言

充电机是城市轨道交通列车的重要组成部分,在正常工作情况下,为车载蓄电池充电;在紧急情况下,可为控制电路、应急照明等设备提供不间断的能源供应;同时列车的日常运行中,还为整列车的直流负载提供能源^[2-3]。

硅基功率半导体器件在电力电子领域一直占据着主导地位。但是,由于硅材料本身的局限性,

以及硅材料器件的制备与加工工艺的日益完善与不断优化,硅材料器件性能已逐渐接近了硅材料本身的应用极限,未来的发展潜力也越来越小,已经无法满足人们对电能的要求^[4]。与传统的硅基半导体材料相比,新型的碳化硅半导体材料为宽禁带半导体,具有高临界电场、低导通电阻以及高导热率等优势。宽禁带(是硅的 2~3 倍)提高了功率半导体器件的工作温度和可靠性;高击穿场强(是硅的 10 倍)提高了功率半导体器件的耐压,减小了功率半导体器件的尺寸;高热导率(是硅的 3 倍)提高了功率半导体器件的功率密度;高饱和电子漂移速度(是硅的 2 倍)提高了功率半导体器件的开关频率;其较强的抗辐射能力,更适合在强辐射环境中使用^[9]。将碳化硅功率半导体器件的应用于充电机中,可以有效提高开关频率,降低输出电压纹波,减小充电机体积,提高功率密度^[5]。Si(硅)和 SiC(碳化硅)的性能对比如表 1 所示。

表 1 Si 和 SiC 性能对比表

材料特性	Si	SiC
禁带宽度/eV	1.12	3.25
击穿电场/(MV/cm)	0.6	2.2
热导率/(W/(cm·K))	1.5	4.9
相对介电常数	11.9	9.7
饱和速度/(10 ⁷ cm/s)	1.0	2
电子迁移率/(cm ² /(V·s))	1 200	1 020
饱和迁移率(cm ² /(V·s))	420	120

本文通过理论分析得出充电机中碳化硅器件的损耗模型,通过 PLECS 软件进行仿真,最后通过搭建碳化硅充电机平台进行损耗试验,将试验值、计算值、仿真值进行对比验证。

1 碳化硅场效应管模块损耗模型

1.1 开关损耗

开关管在开通、关断时,由于漏源极电压与漏极电流曲线在上升和下降的过程中会出现交截,因而会产生开通和关断损耗^[10]。开关损耗计算公

式为:

$$P_{\text{switch}} = f_s (E_{\text{on}} + E_{\text{off}}) \quad (1)$$

式中:

P_{switch} ——开关损耗;

f_s ——开关管工作频率;

$E_{\text{on}}, E_{\text{off}}$ ——分别为开关单次开通损耗和关断损耗,可根据器件的数据手册资料查到。

1.2 驱动损耗

驱动损耗是驱动电压给开关管栅源极寄生电容充放电的过程中产生的损耗,与驱动电压、开关管的工作频率和栅源极寄生电容的大小有关,开关管的驱动损耗技术公式为:

$$P_{\text{drive}} = V_{g(\text{on})} Q_g f_s \quad (2)$$

式中:

P_{drive} ——驱动损耗;

Q_g ——开关管的栅极总电荷;

$V_{g(\text{on})}$ ——栅极驱动电压。

1.3 导通损耗

开关管导通时,其导通电阻值 $R_{\text{DS(on)}}$ 近似恒定不变,因此开关管的导通损耗 $P_{\text{mos(on)}}$ 主要受变压器原边电流 I_T 与导通时间影响。 $P_{\text{mos(on)}}$ 的计算公式为:

$$P_{\text{mos(on)}} = R_{\text{DS(on)}} I_T^2 D(t) \quad (3)$$

式中:

$D(t)$ ——开关管占空比。

1.4 体二极管损耗

二极管的导通时间比为 $(1-D(t))$,因此二极管的导通损耗 $P_{\text{Diode(on)}}$ 计算公式为:

$$P_{\text{Diode(on)}} = (0.5 - D(t)) I_T U_f \quad (4)$$

式中:

U_f ——体二极管导通压降。

体二极管关断时不能立刻截止,需要一定的反向恢复电流降为零才能恢复阻断状态,二极管的反向恢复损耗近似计算公式为:

$$P_{\text{Diode(off)}} = f_s U_D Q_{rr} \quad (5)$$

式中:

U_D ——体二极管反向截止电压平均值;

Q_{rr} ——反向恢复充电电荷量。

1.5 碳化硅场效应管模块总损耗

因碳化硅模块驱动损耗较小,故忽略不计。单个碳化硅场效应管模块的主要损耗总和 P_Q 计算公式:

$$P_Q = P_{\text{mos(on)}} + P_{\text{switch}} + P_{\text{Diode}} \quad (6)$$

2 基于 PLECS 软件的仿真模型

2.1 碳化硅场效应管模块损耗模型建立

场效应管选型采用了科瑞官网的热阻模型,该模型包含有碳化硅场效应管的开通损耗、关断损耗、导通损耗以及体二极管的导通损耗。

在 PLECS 软件中建立场效应管模块的热模型。在该模型中,开通损耗和关断损耗可以用一个 3D 数据表格来描述,即依据功率模块数据手册填入在不同测试温度、不同输入电压下流经场效应管特定电流时的损耗数据^[6-7]。碳化硅器件开关损耗模型如图 1 所示。

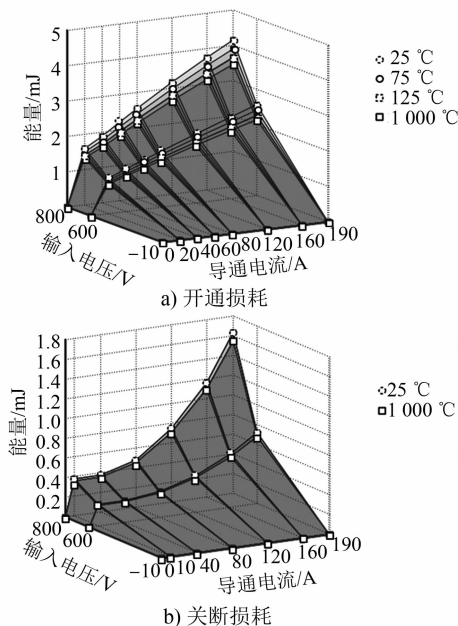


图 1 不同温度的碳化硅器件开关损耗模型

导通损耗可以用一个二维数据表格来描述,用以表示不同电流流经场效应管和其本身自带的反并联体二极管时,场效应管模块的漏源两端所承受的正向导通压降的大小,再经计算便可以得出器件的损耗。场效应管和其体二极管导通电压-电流曲线如图 2 所示。

2.2 仿真验证

SiC 充电器中功率模块采用科瑞公司型号为 CAS120M12BM2 的模块,该模块的具体参数如表 2 所示。

SiC 充电器原、副边均采用全桥结构,副边还包含滤波电感、电容。SiC 充电器仿真模型如图 3 所示。该仿真模型设计参数如表 3 所示。

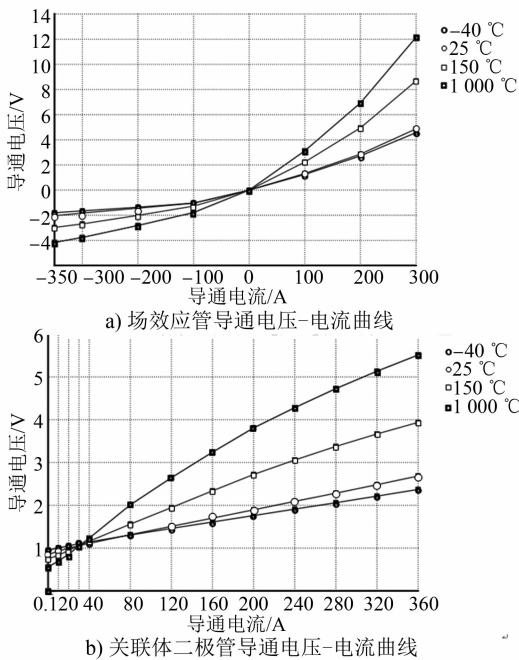


图 2 不同温度的场效应管和其体二极管导通电压-电流曲线

表 2 SiC 充电机功率模块参数

器件参数	模型值
导通电阻/ $\text{m}\Omega$	13
漏源电压/V	1200
漏极电流/A	193
开通能量/mJ	$1.7(V_{\text{DD}}=600\text{ V}, I_{\text{D}}=120\text{ A})$
关断能量/mJ	$0.4(V_{\text{DD}}=600\text{ V}, I_{\text{D}}=120\text{ A})$

注： V_{DD} 为漏极电压； I_{D} 为漏极电流。

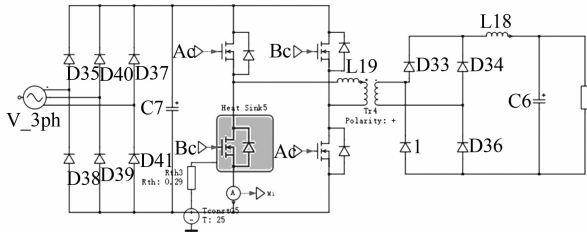


图 3 SiC 充电机仿真模型

表 3 SiC 充电机仿真模型设计参数

参数	设计值
滤波电感/ mH	20
滤波电容/ μF	100
开关频率/ kHz	50
输入线电压/V	380
变压器变比	3.2:1

仿真模型搭建完成后,对各个阶段输出波形进行观测。SiC 充电机不控整流部分输入电压 U_{in} 波形如图 4 所示。SiC 充电机副边滤波后输出电压 U_{out} 波形如图 5 所示。

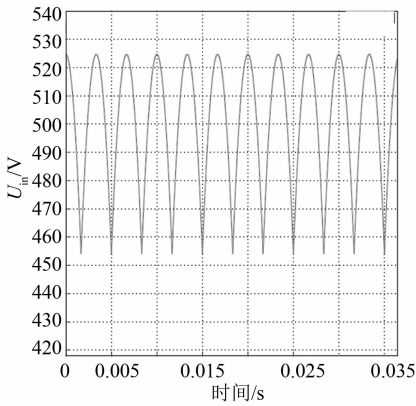


图 4 SiC 充电机不控整流部分电压波形

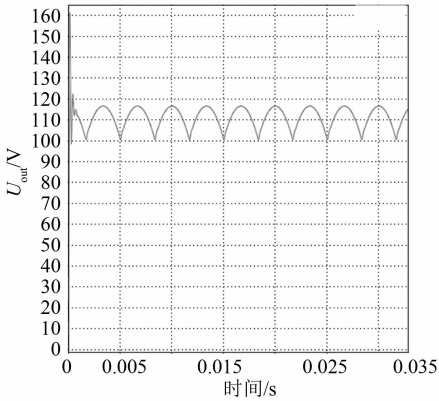


图 5 SiC 充电机副边滤波后输出电压波形

对原边场效应管模块损耗进行仿真计算^[8]。再通过损耗模型进行计算,最后进行结果对比。代入碳化硅场效应管器件模块(CAS120M12BM2)的关断时间参数与输出电容参数。在 $f_s=50\text{ kHz}$ 情况下,计算可得开关损耗为:

$$P_{\text{switch}}=50\text{ kHz}\times(1.1\text{ mJ}+0.2\text{ mJ})=65\text{ W}$$

输入电流随负载功率变化,原边电流有效值为 29.7 A,占空比为 0.45,代入碳化硅器件(CAS120-M12BM2 模块)的导通电阻参数,则计算可得单个碳化硅 MOSFET 模块的导通损耗为:

$$P_{\text{mos(on)}}=29.7\text{ A}^2\times13\times10^{-3}\text{ }\Omega\times0.45=5.16\text{ W}$$

表 4 碳化硅场效应管模块损耗计算值与仿真值对比表

项目	计算值/W	仿真值/W	误差/%
开关损耗	65.00	57.50	11.50
导通损耗	5.16	4.82	6.59

因开关损耗过程时间短,计算模型过于理想化,导致误差偏大。但导通损耗误差较小,证明导通损耗模型精确度高。开关损耗误差仍在可控范围内,可为充电机系统设计提供一定参考。

3 试验验证

3.1 试验平台搭建

为验证前文所提 SiC 充电机损耗计算模型的合理性,研制了一台 SiC 充电机。该充电机包括不控整流、软启动、主控系统以及全桥 DC-DC 4 部分,如图 6 所示。该充电机设计参数如表 5 所示。

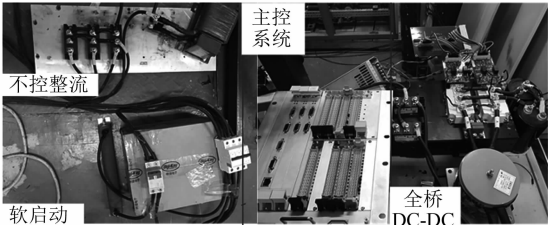


图 6 SiC 充电机实验平台

表 5 SiC 充电机设计参数

参数	设计值
额定输出功率/kW	15
额定输入电压/V	AC 380
额定输入频率/Hz	50
输出电压/V	DC 95~126(额定电压 110 V)
变压器变比	3.2:1

3.2 试验结果分析

对所研制的 SiC 充电机进行功能验证,包括软启动试验、带载试验和损耗试验。

1) 软启动波形:输入三相交流电压后,SiC 充电机开始软启动过程,输出电压如图 7 所示。

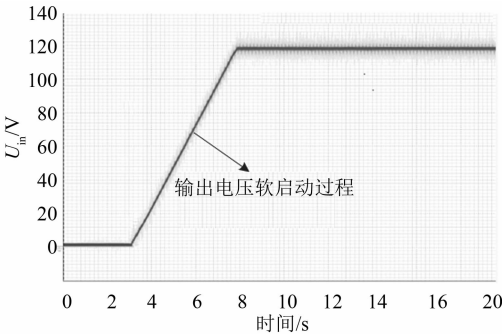
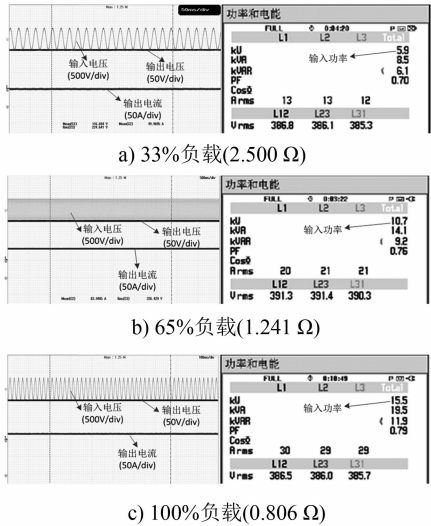


图 7 SiC 充电机软启动输出电压波形

由图 7 可见,该充电机输出电压在 5 s 内平缓上升至 95 V 左右,符合软启动设计预期。在实际应用中,软启动时间设置略大于仿真模型中的软启动时间。

2) 带载试验:为了验证该充电机是否满足设计要求,是否与满载时的理论分析结果一致,通过功率损耗测试试验,分别测试该充电机不同负载情况下的效率。该充电机不同负载情况下的输出电压、

输出电流、输出功率和输入功率如图 8 所示。



注:以电阻值代表负载大小。

图 8 SiC 充电机带载输出能力截图

3) 损耗试验:器件的开关损耗与器件的工作频率正相关。通过提升 SiC 充电机的开关频率发现器件损耗随开关频率增加而逐渐增加。通过测量功率模块两端的电压电流,将电压与电流的乘积视为 SiC 充电机的功率损耗。该充电机功率损耗的试验值、仿真值、计算值如图 9 所示。

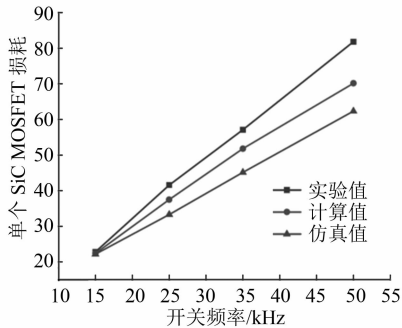


图 9 不同频率下单个 SiC MOSFET 模块的试验值、仿真值和计算值对比图

由图 9 中可见,该充电机功率损耗的试验值、仿真值、计算值较为吻合。误差是由仿真模型、计算模型与试验中的差异造成的。由于三者之间的差异较小,因此计算模型仍对 SiC 充电机损耗预测有着较高可信度。

4 结语

本文基于 PLECS 软件提出了一种碳化硅充电机功率模块损耗计算方法,给出了 SiC MOSFET (下转第 103 页)

预测盾构掘进时刀盘切口后方 20 m 至前方 40 m 的地表隆沉。

3) 基于 Mindlin 解求得的施工荷载对地表位移场的各种作用中,盾壳摩擦力 f 对地表位移起主要作用,附加支护力 Δp 的作用较小,刀盘扭矩 T 的作用可被忽略。

参考文献

- [1] DAMMYR, Øyvind. Pressurized TBM-shield tunneling under the subsidence sensitive grounds of Oslo: Possibilities and limitations [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 47-55.
- [2] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground [C] //State-of-the-Art Report. Proceedings of 7th International Conference on oil Mechanics and Foundation Engineering State of the Art Report. Mexico: State-of-the-Art Report, 1969: 225-290.
- [3] 韩焯, 李宁, STANDING J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析 [J]. 岩土力学, 2007(1): 23.
- [4] PARK K H. Elastic solution for tunneling-induced ground movements in clays [J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(4): 310-318.
- [5] 王立忠, 吕学金. 复变函数分析盾构隧道施工引起的地基变形 [J]. 岩土工程学报, 2007(3): 319.
- [6] 姜忻良, 赵志民. 镜像法在隧道施工土体位移计算中的应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005(6): 801.
- [7] NG C, WW L, KIN M T, et al. Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(3): 523-539.
- [8] ATTEWELL B, YEATES J, SELBY A R. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures [M]. Glasgow: Blackie, 1986. 10-50.
- [9] O'REILLY M P, NEW B M. Settlement above tunnels in the United Kingdom—their magnitude and prediction [C] //Institution of Mining & Metallurgy. Proceedings of the 3rd international symposium. Brighton. London: Institution of Mining & Metallurgy, 1982: 173-181.
- [10] 金大龙. 盾构隧道群下穿既有地铁运营隧道变形机理及控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [11] ROWE R K, LO K Y, KACK G J. A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(1): 11-22.
- [12] 韩月旺, 梁精华, 袁小会. 盾构隧道壁后注浆体变形模型及土体位移分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007(增刊 2): 3646.
- [13] LO K Y, ROWE R K. Predicting settlement due to tunnelling in clay [C] //ASCE. Tunnelling in Soil and Rock. Atlanta: ASCE, 1984: 46-76.
- [14] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid [J]. Journal of Applied Physics, 1936, 7(5): 195-202.

(收稿日期: 2019-11-22)

(上接第 97 页)

模块的开关损耗、导通损耗、驱动损耗和体二极管导通损耗的计算方法,并对比分析了 MOSFET 模块开关损耗和导通损耗的计算值与仿真值,结果表明:碳化硅器件的开关损耗和导通损耗模型可为系统设计提供参考,其中导通损耗模型精确度高。对所研制的 SiC 充电机进行了功能验证,对比分析了该充电机功率损耗的试验值、仿真值、计算值,结果表明:通过计算模型能够预测充电机功耗,而且效果优于仿真模型的。

参考文献

- [1] 康成伟, 刘博, 张国芹, 等. SiC MOSFET 驱动参数的协同控制研究 [J]. 电力电子技术, 2020(10): 77.
- [2] 孙大南. 动车组与电力机车高频化辅助变流系统主电路研究 [J]. 电工电能新技术, 2019(3): 74.
- [3] 吴佐民. 城市轨道交通高频充电机研制 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [4] LIU B, LI W, MENG D, et al. Low Stray Inductance Optimized Design for Power Circuit of SiC-MOSFET Based Inverter [J]. IEEE Access, 2020, 99: 1.
- [5] LI W, MA Y, MEI W, et al. Evaluation of Full-SiC-Based Integrated Inverter Prototype [C] //IEEE. 2019 IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA). Singapore: IEEE, 2019: 43-46.
- [6] 滕欣元, 郑建勇. 基于 PLECS 的 SiC 逆变器热设计研究 [J]. 电测与仪表, 2020(13): 17.
- [7] 刘博如. 基于 PLECS 的车载 SiC 单相逆变器损耗研究 [J]. 电力电子技术, 2019(8): 118.
- [8] YU L C, DUNNE G T, MATOCHA K S, et al. Reliability Issues of SiC MOSFETs: A Technology for High-Temperature Environments [J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2011, 10(4): 418-426.
- [9] 刘博, 刘伟志, 董侃, 等. 基于全碳化硅功率组件的变流器母排杂散电感解析计算方法 [J]. 电工技术学报, 2021(10): 2105.
- [10] DIAO L, DU H, SHU Z., et al. A Comparative Study Between AI-HM and SPD-HM for Railway Auxiliary Inverter With Pulsating DC Link [J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5816-5825.

(收稿日期: 2021-03-20)