



3.3 kV SiC MOSFET 驱动器设计与研究

忻兰苑¹, 林珍君¹, 陈燕平¹, 王晓年¹, 徐绍龙²

(1. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 文章深入分析了3.3 kV SiC MOSFET的电气特性, 全面梳理了当前SiC驱动器的研究现状。在此基础上, 详细阐述了高压SiC MOSFET驱动器的设计方案, 比较了其与传统IGBT驱动器的技术差异, 设计了一款具备多级软关断功能的3.3 kV SiC MOSFET数字驱动器, 并通过双脉冲测试、短路测试和功率试验对该驱动器进行了全面的功能验证和性能评估。试验结果表明, 这款驱动器具有瞬时驱动电流高、栅极串扰低、短路保护速度快的特点, 多级软关断功能在减少电压应力的同时还能缩短关断时间, 实现器件的快速关断。

关键词: SiC MOSFET; 驱动器; 多级软关断

中图分类号: U264.3⁺7

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)01-0135-08

0 引言

低碳、节能是目前我国轨道交通行业主要的发展方向。电能作为轨道交通车辆消耗的主要能源和运营的主要成本, 如何降低能耗备受关注, 而牵引系统和辅助供电系统作为车辆主要的耗能部件, 其节能减重是重点研究方向^[1-2]。

作为新一代半导体材料, SiC具有宽禁带、高击穿场强、高热导率、高电子漂移速率等特点, 相比Si材料, 以SiC材料制成的功率器件具有更高的工作温度、更高的阻断电压、更高的工作频率以及更低的导通电压^[1,3]。

SiC MOSFET兼具Si MOSFET和Si IGBT的优点。由于SiC具有高击穿场强特性, 相比Si MOSFET, 其阻断电压可以提升至更高, 阻断电压范围基本覆盖Si IGBT的电压等级^[4], 并且具有更低的导通压降。同时, 由于SiC MOSFET为单极型器件, 其开关速度更快且没有拖尾效应, 相比Si IGBT, 具有更低的开关损耗和更高的开关频率。

尽管IGBT在运行结温、损耗特性等方面也在不断优化升级, 但是仍然受限于Si材料和双极型器件自身的局限性。随着SiC技术不断成熟, SiC MOSFET为轨道交通变流装置提供了一种新的选择, 同时也为变流技术的升级提供一种新的可能^[5]。

目前, 在轨道交通牵引应用中, 主要使用3.3 kV电压等级的IGBT, 如采用SiC MOSFET进行替换, 可大幅降低损耗、提高应用频率和功率密度。相比IGBT, SiC器件具有更低的导通电压阈值、更快的开关速度、结电容小等特点, 因此直接将IGBT驱动移植到SiC应用方面不可行, 需要根据SiC器件的特点对驱动器进行专门的开发设计。

有关SiC MOSFET驱动器设计的研究大多聚焦于1.2 kV电压等级的低压器件, 在这一电压等级方面存在较多成熟的驱动隔离芯片供选择, 降低了驱动器设计的难度, 而关于3.3 kV电压等级的SiC驱动器研究较少。文献[6]提出了3.3~15 kV SiC MOSFET驱动器设计需要重点关注的问题, 如绝缘设计和过流保护设计, 但是并未就某一具体SiC器件开展驱动器设计。文献[7]设计了一款用于3.3 kV SiC MOSFET的即插即用型

基金项目: 湖南省科技创新计划资助项目(2025RC1075)

通信作者: 忻兰苑, 女, 高级工程师, 主要从事功率器件应用方面的研究; E-mail: xinly@csrzc.com

引用格式: 忻兰苑, 林珍君, 陈燕平, 等. 3.3 kV SiC MOSFET驱动器设计与研究[J]. 机车电传动, 2026(1): 135-142.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.018.

Citation: XIN Lanyuan, LIN Zhenjun, CHEN Yanping, et al. Design and study of 3.3 kV SiC MOSFET drivers[J]. Electric drive for locomotives, 2026(1): 135-142.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.018.

驱动器，但是驱动逻辑单元采用商用驱动芯片实现，研究重点为功率PCB的寄生电感对器件开关特性的影响，对驱动器设计未做深入的探讨。

本文对3.3 kV的全SiC MOSFET器件进行了电气特性分析，基于轨道交通的应用需求，结合原IGBT驱动的技术平台，基于逻辑门阵列（FPGA）芯片开发了一款3.3 kV SiC MOSFET专用的即插即用驱动器，并通过双脉冲试验和短路试验开展了驱动器的功能和性能验证。

1 SiC MOSFET 特性

SiC MOSFET与Si MOSFET、IGBT一样都为电压控制型器件，因此驱动器的基本实现方式和功能比较相似。

根据芯片栅极结构，可分为平面栅和沟槽栅。其中，平面栅所承受的电场强度更低，工艺实现难度相对较小，更有利于制作高耐压等级器件，目前大部分3.3 kV电压等级的SiC MOSFET采用平面栅^[8]。沟槽栅由于具有更小的元胞尺寸、更低的沟道电阻、更小的米勒电容等优势，在进一步降低损耗、提升电流密度方面有较大潜能，依然是未来重要的发展方向。

3.3 kV全SiC器件采用新型开源半桥标准封装，从结构形式上分为两种：一种接近IGBT的形式，器件内部的MOSFET芯片与SBD芯片反并联；另一种内部只有MOSFET芯片，利用体二极管和MOSFET沟道流通反向电流。

SiC MOSFET与IGBT相比存在较大的物理性能差异，SiC MOSFET具有更快的开关速度、更小的损耗、反向恢复应力更小的特点。更快的开关速度意味着器件开关瞬间有更高的 dI/dt ，以3.3 kV电压等级的SiC MOSFET与IGBT为例，SiC MOSFET的 dv/dt 可达12~18 kV/ μs ，而IGBT仅为2.2 kV/ μs ^[4,9]。

表1列出几款3.3 kV、相同电流等级IGBT和SiC器件的部分电气参数。由表1可知，SiC MOSFET的栅极电压与IGBT的栅极电压有较大不同，3.3 kV的IGBT栅极电压均为 ± 15 V，SiC MOSFET栅极关断负压为-5 V，栅极开通电压为15 V或17 V。在设计SiC驱动隔离电源时，需要关注SiC MOSFET栅极负压与IGBT栅极电压的差异。

表1 3.3 kV SiC MOSFET和Si IGBT主要电气参数表^[10-14]
Table 1 Main electrical characteristics of 3.3 kV SiC MOSFET and Si IGBT ^[10-14]

器件类型	I_C 或 I_D/A	V_{GE} 或 V_{GS}/V	$Q_G/\mu C$	V_{th}/V	$T_{sc}/\mu s$	I_{sc}/A
IGBT	450	± 15	12.5	5.8	10	1 800
SiC	500	15/-5	2.5	4.3	3	5 400
IGBT	1 000	± 15	28.0	4.8	10	4 200
SiC	1 000	15/-5	5.0	4.3	3	9 100
SiC	750	17/-5	6.7	2.1	4	

对于阈值电压 V_{th} ，SiC的阈值电压根据厂家的不同有所差异，但均低于IGBT，当结温升高后， V_{th} 还会进一步降低，过低的阈值电压会加剧串扰带来的负面影响。

当功率器件开通或关断时，对管会通过米勒电容在栅极产生正向或者负向的电压尖峰，称之为串扰电压。以半桥电路为例，当上管开通时，下管漏极（D）的电位迅速抬升，米勒电容 C_{GD} 向栅极放电产生电流，一部分电流向栅极电容 C_{GS} 充电，另一部分电流通过栅极电阻流向驱动器，使得栅极电压 V_{GS} 抬升，产生正向串扰。反之，上管关断时，电流方向相反， V_{GS} 下降，产生负向串扰。栅极串扰产生的原理如图1所示。

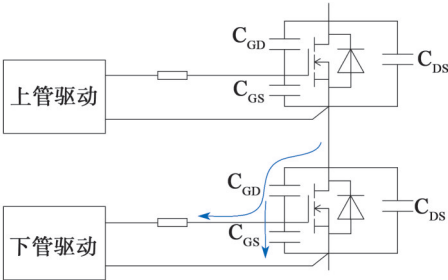


图1 栅极串扰产生示意图
Fig. 1 Mechanism of gate crosstalk

正向串扰电压容易导致对管误开通，负向串扰电压容易导致SiC器件的栅极电压超出最低负栅压的限制值，引发栅极失效。串扰电压的大小与器件的 dV_{DS}/dt 及结电容相关，当SiC MOSFET开关时，会产生数倍于同规格IGBT的 dV_{DS}/dt 值，造成较大的串扰电压，同时SiC器件更窄的栅极电压范围对串扰的冗余范围更窄，进一步加剧了串扰带来的负面影响。因此，在SiC MOSFET应用中需要特别关注串扰电压幅值，当串扰电压值过高时应采取必要的抑制措施。

常见的抑制串扰电压方法有减小 dV_{DS}/dt 、增加外部栅极电容、减小栅极电阻，这些方法简易便捷，但是会影响功率器件的开关特性；也可在驱动器设计时增加米勒箝位电路，为处于关断状态的器件栅极提供一条低阻抗路径，快速泄放串扰能量。

SiC MOSFET芯片面积比Si IGBT小，发生短路工况时电流比IGBT更大，而短路时SiC MOSFET芯片内部的温度分布更加不均衡，且上升速率更快，从而导致更快达到临界温度而发生失效^[15]。通过表1列出的短路时间 T_{sc} 可看到，IGBT可承受10 μs 短路，而SiC MOSFET仅3~4 μs ，因此驱动器需要有更短的短路检测时间和更快的保护响应速度。

SiC MOSFET更快的开关速度使其对驱动回路的寄生参数更加敏感^[16]，驱动回路上过大的寄生参数容易引发更多振荡，影响SiC器件的动态特性，因此驱动器与SiC器件的连接方式需要谨慎评估。

2 驱动设计

2.1 驱动架构

3.3 kV SiC MOSFET 器件为半桥器件, 内部有2只开关管, 中间部分为辅助端, 直流端和交流端分别位于辅助端两侧。

本文设计的3.3 kV 驱动器采用叠板结构, 上下层叠板之间通过排针进行硬连接, 下层板直接安装在SiC MOSFET 器件上, 如图2所示。轨道交通用3.3 kV 功率器件驱动器常见的互连方式为驱动器通过导线与安装在功率器件上的适配板连接。相比传统的导线连接, 排针连接使得栅极回路的寄生电感值更低, 可有效减小器件栅极的正向串扰峰值^[17]。



图2 驱动器安装实物图

Fig. 2 Photos of driver installation

驱动器整体架构如图3所示。其中, 驱动隔离电源的输入侧采用15 V 供电电源, 输出侧分成2路供电, 分别驱动功率器件的上开关管和下开关管; PWM 脉冲信号和故障反馈信号位于驱动电源的输出侧, 通过光纤通信的方式与上级联通, 相比通过隔离芯片实现信号隔离的方式, 光纤通信具有更强的共模抗扰能力; 驱动逻辑功能由FPGA 实现。

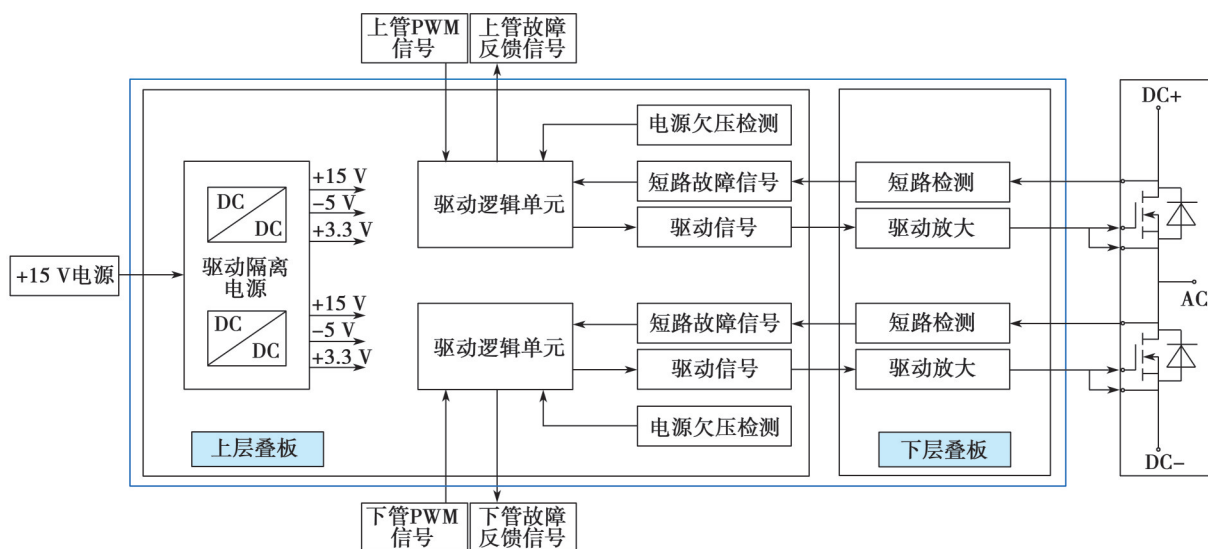


图3 驱动器电路功能图

Fig. 3 Functional block diagram of driver circuit

2.2 驱动电源

驱动电源采用推挽电路, 通过变压器实现输入与输出、两路输出的隔离, 变压器的耐压根据3.3 kV SiC MOSFET 实际应用的母线电压选取为6.0 kV, 驱动电源每路可输出5 W 功率。

当SiC 器件开关时, 输出侧产生较高的 dV_{DS}/dt , 形成高频干扰源, 变压器内部的寄生电容为高频信号提供耦合路径, 容值越大、阻抗越小, 导致输入侧产生共模干扰^[18-19]。因此, 在设计驱动器时, 隔离变压器的耦合电容小于10 pF。

由表1可知, SiC MOSFET 的 Q_G 约为同规格IGBT 的1/6~1/5, 但是应用开关频率可达到5~10 倍。栅极功率为

$$P = Q_G \times (V_{G_ON} - V_{G_OFF}) \times f_{SW} \quad (1)$$

式中: Q_G 为栅极电荷; V_{G_ON} 为栅极开通电压, $V_{G_ON} = 15$ V; V_{G_OFF} 为栅极关断电压, $V_{G_OFF} = -5$ V; f_{SW} 为开

关频率。

根据轨道交通SiC 牵引变流器的应用工况, 开关频率约为2 kHz^[3-4], 因此该驱动器隔离电源功率满足需求。

驱动器输出侧的3.3 V 电源用于FPGA 等逻辑电路供电。为确保电源可靠工作, 设置了欠压检测电路(15 V, -5 V, 3.3 V)。为确保SiC 器件栅极始终处于正常工作范围, 15 V 电源的欠压保护阈值为12.6 V。

2.3 驱动逻辑功能

驱动器输出侧采用FPGA 芯片实现逻辑功能, 包括PWM 信号处理、短路故障信号处理、欠压信号处理等。外部通过光纤输入PWM 信号, 在FPGA 中进行信号处理, 生成功率器件开通和关断信号。短路检测电路和欠压检测电路将处理完成后的信号输入到FPGA, 当发生功率器件短路或者电源欠压时, FPGA 立刻发出停止功率器件开通的信号, 并通过光纤向外部控制器反馈故障信息, 若发生短路故障还会额外触发软关断

检测的准确性。

退饱和检测方式能同时实现过流检测和短路检测, 当检测电压达到阈值 V_{ref} 时, 比较器将过流或短路故障信号输入给逻辑电路, 并在 3~4 μs 内触发软关断功能, 具体如图 7 所示。

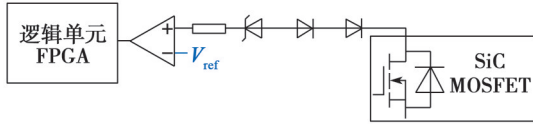


图7 V_{DS} 检测电路

Fig. 7 V_{DS} detection circuit

3 试验分析

3.1 主电路

为验证该驱动器的功能, 搭建半桥测试电路, 如图 8 所示。在图 8 中, 以下管 S2 为被测管, 上管 S1 作为陪测管, 为避免栅极串扰电压引起陪测管误开通, 需要在栅极提供恒定的负压; C_d 为直流母线电容, 先由高压直流电源预充电至试验电压, 然后断开充电开关 K, 当被测管导通时由 C_d 提供能量。

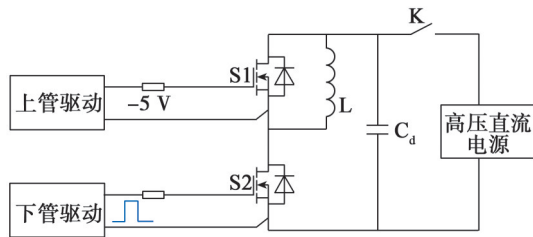


图8 半桥测试电路

Fig. 8 Half-bridge test circuit

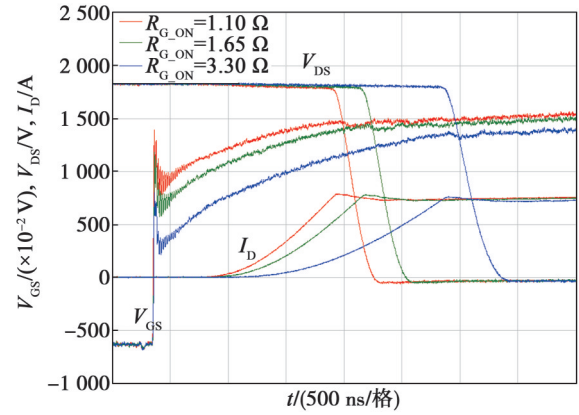
3.2 开关特性试验

图 9 为 3.3 kV/750 A 的 SiC MOSFET 器件在 1.8 kV/750 A 时的开关特性测试波形。由图 9 可知, 随着栅极电阻增大, 开通和关断时间变长, di/dt 、 dV/dt 斜率明显变缓; 由于被测 SiC 器件内部并联了 SBD 芯片, 因此开通时几乎没有反向恢复电流, 反向恢复能量 E_{rec} 极低, 同时也能减小开通损耗 E_{ON} , V_{DS} 下降时没有 IGBT 常见的拖尾电压, 进一步减小了 E_{ON} ; 关断时同样没有 IGBT 的拖尾电流, V_{DS} 以远高于 IGBT V_{CE} 的速率上升, 因此关断损耗 E_{OFF} 很小。

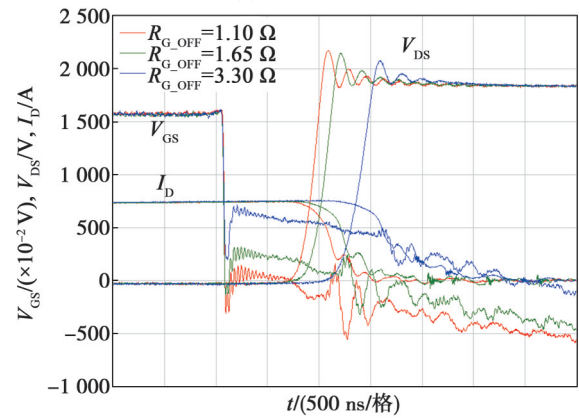
针对不同的功率器件^[19], 使用相同驱动电阻 $R_{G_ON}=1.65\ \Omega$ 、 $R_{G_OFF}=3.30\ \Omega$ 开展不同输出电流测试, 如图 10 所示。由图 10 可知, 驱动信号一致性较好, 随电流增大开通时间变长、关断时间变短。

3.3 驱动能力

根据驱动放大电路设计中的结论, 当图 6 中 NMOS (Q2) 的栅极电压沿用 IGBT 驱动设计时, 会导致 Q2 无



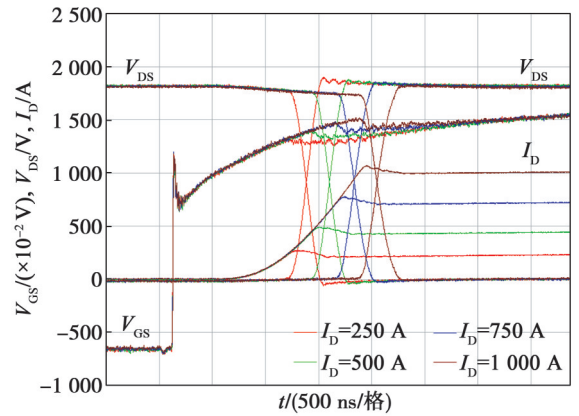
(a) 开通过程



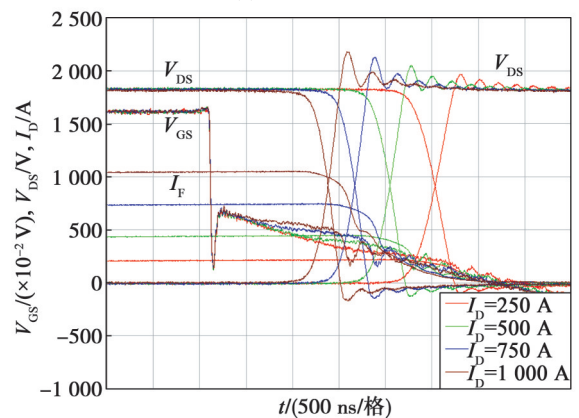
(b) 关断过程

图9 不同栅极电阻的开关特性

Fig. 9 Gate-resistance-dependent switching characteristics



(a) 开通过程



(b) 关断过程

图10 不同电流的开关特性

Fig. 10 Current-dependent switching characteristics

法输出足够的瞬时电流，SiC MOSFET 的关断栅极电流变小，关断速度受到影响。图 11 为栅极瞬时驱动电流能力对功率器件动态性能影响的示意图。

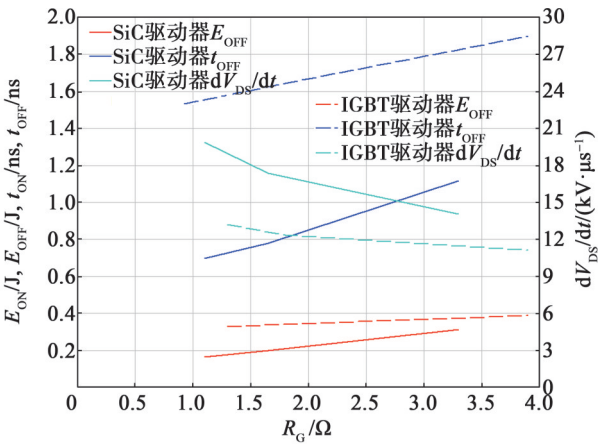


图 11 驱动瞬时电流能力影响动态性能

Fig. 11 Impact of driver's instantaneous current capability on dynamic performance

由图 11 可知，对 IGBT 驱动器仅改变栅极负电源值，并直接作用于 SiC MOSFET 时，在同样的关断电阻 R_{G_OFF} 和相同测试条件下，IGBT 驱动器对应的关断能量 E_{OFF} 、关断时间 t_{OFF} 都在增大，且随着 R_{G_OFF} 的改变， E_{OFF} 、 t_{OFF} 变化幅度非常平缓，这说明受限的 NMOS 输出能力也限制了驱动电阻对 SiC MOSFET 关断特性的调节能力。

3.4 多级软关断

驱动器通过检测 SiC MOSFET 的 V_{DS} 电压来进行故障识别，实现过流保护和短路保护。当 V_{DS} 超出阈值电压时，图 7 中驱动器故障检测电路的比较器发出故障信号，逻辑电路动作，触发软关断功能。图 12 为软关断和正常关断的电路波形，表 2 为软关断和正常关断试验数据对比。

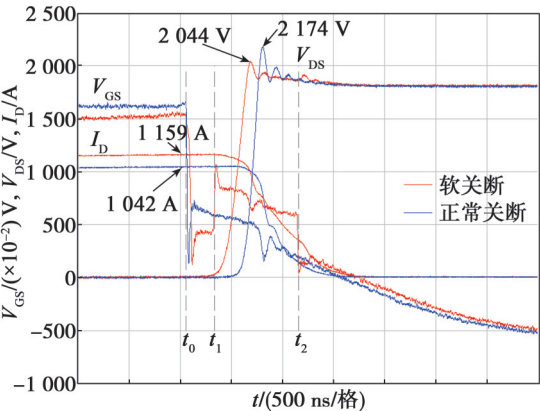


图 12 软关断和正常关断

Fig. 12 Soft turn-off and normal turn-off

由图 12 可知，在时刻 t_0 ，栅极电压 V_{GS} 开始下降，此时图 6 中的关断 NMOS(Q2)和软关断 NMOS(Q3)同时工作，加速关断时间；在时刻 t_1 ，Q2 停止工作，Q3 单

独工作，通过降低关断速度抑制关断电压尖峰；在时刻 t_2 ， V_{DS} 电压已经建立，Q3 停止工作，切换至正常关断信号，加快栅极电压下降，信号时序如图 5 所示。

由表 2 可知，这种多级软关断功能能有效降低 V_{DS} 电压上升速率、抑制关断时的电压尖峰，避免大电流关断时产生过大的电压应力；同时，从波形中也可看到，与传统的软关断相比，多级软关断不会延长关断时间，可以安全并快速地切断电流。

表 2 软关断和正常关断试验数据

Table 2 Soft vs. normal turn-off test data

关断类型	关断电流/A	关断电压尖峰/V	电压速率/(V·μs ⁻¹)	关断能量/J
正常关断	1 042	2 174	12 760	0.500
软关断	1 159	2 044	8 850	0.972

3.5 短路试验

当 IGBT 短路时，电流会迅速上升到峰值之后维持在相对恒定的饱和电流值，而 SiC MOSFET 很难达到饱和电流，短路电流线性上升，其斜率由短路回路阻抗决定，因此需要及时关断 SiC 器件，防止电流继续增大引发热失效。图 13 为短路测试波形。由图 13 可知，SiC 驱动器能迅速检测到短路故障并执行软关断，有效保护了 SiC MOSFET。

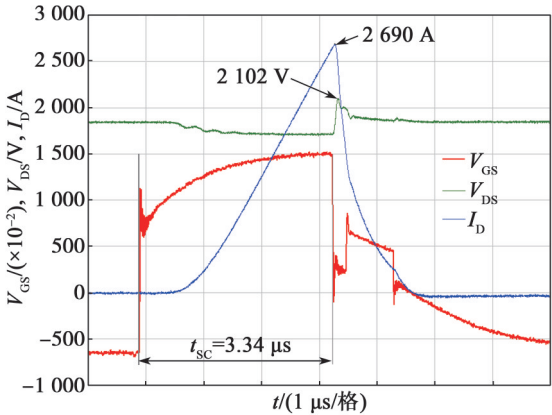


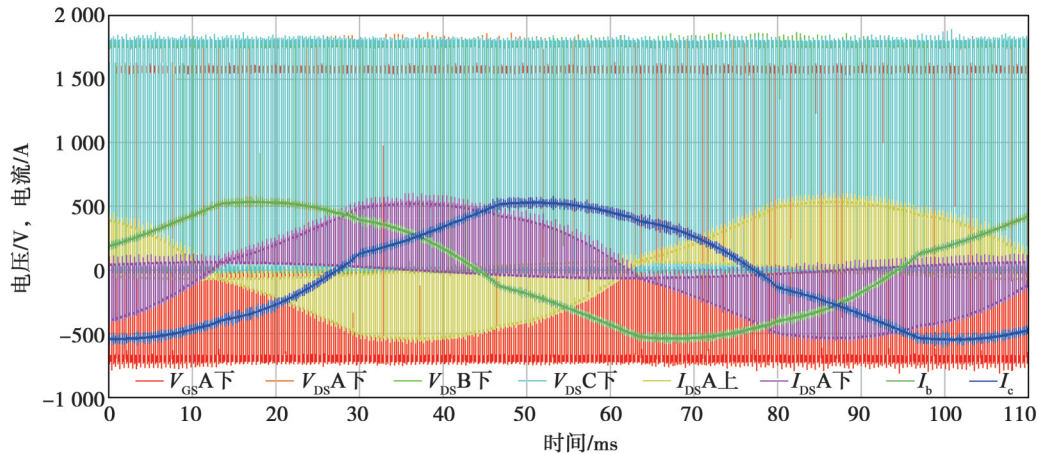
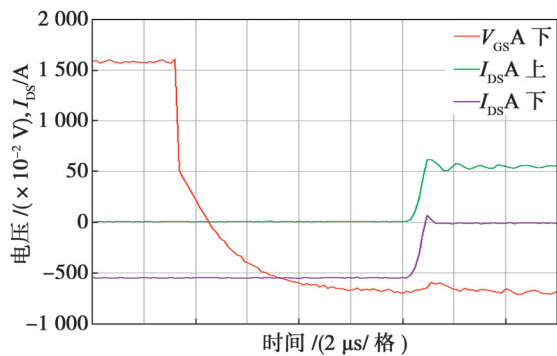
图 13 短路测试

Fig. 13 Short-circuit test

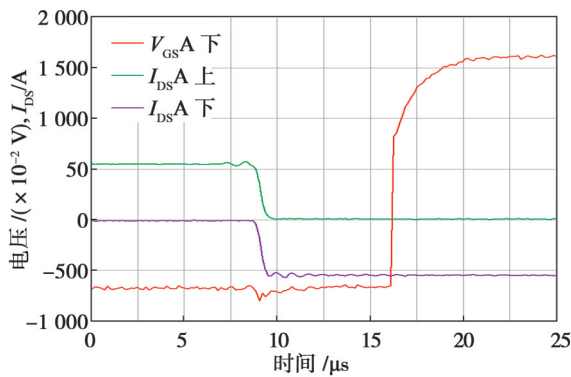
3.6 功率试验

将该驱动器装备于 SiC MOSFET 三相逆变器中，在直流电压 1.8 kV、开关频率 1~5 kHz、电流 200~500 A 的工况下进行功率试验，各项性能指标均满足技术要求，设备能够正常运行。图 14 为开关频率 2 kHz、逆变输出电流 375 A 的试验波形。

图 15 为功率试验时有关信号波形的放大图。由图 15 可知，当上管开通或关断时，下管 SiC MOSFET 栅极的串扰电压幅值很小，不会对 SiC 器件的运行造成影响。

图14 功率试验波形($f_{sw}=2\text{ kHz}$, $I_D=375\text{ A}$)Fig. 14 Power test waveform($f_{sw}=2\text{ kHz}$, $I_D=375\text{ A}$)

(a) 关断时刻



(b) 开通时刻

图15 功率试验中的栅极串扰波形

Fig. 15 Gate crosstalk waveform in power test

4 结论

本文通过对3.3 kV SiC MOSFET器件的电气参数及其行为特性进行分析,总结了大功率高压SiC驱动器的设计要点。基于3.3 kV全SiC功率器件开发了一款数字驱动器,从电源、功率放大、短路检测与保护等方面详细阐述了驱动器设计的关键技术,并通过试验验证了驱动器的功能满足3.3 kV大功率SiC MOSFET的应用,充分证实了分析和设计的有效性,为高压大功率的SiC MOSFET器件应用提供了技术保障。该驱动器采用FPGA芯片实现驱动逻辑功能,不仅可以有效减

小驱动器尺寸,而且能进一步实现故障的分类分级、故障信息存储等丰富功能。

参考文献:

- [1] 赵炫, 蒋栋, 刘自程, 等. SiC 功率器件在轨道交通行业中的应用[J]. 机车电传动, 2020(1): 38-44.
ZHAO Xuan, JIANG Dong, LIU Zicheng, et al. Application of silicon carbide power devices in rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2020(1): 38-44.
- [2] 马法运, 毕京斌, 夏猛, 等. SiC-MOSFET 在地铁牵引系统中的应用研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(10): 27-31.
MA Fayun, BI Jingbin, XIA Meng, et al. Application of SiC-MOSFET in metro traction system[J]. Power electronics, 2020, 54(10): 27-31.
- [3] 李华, 万伟伟, 唐雄辉, 等. SiC 器件在城轨车辆牵引系统上的应用研究[J]. 机车电传动, 2020(5): 45-48.
LI Hua, WAN Weiwei, TANG Xionghui, et al. Application of SiC devices in traction system of urban rail vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2020(5): 45-48.
- [4] 杨涛, 窦泽春, 朱武, 等. 基于 SiC MOSFET 的牵引逆变器在轨道交通中的应用研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 28-33.
YANG Tao, DOU Zechun, ZHU Wu, et al. Application research on SiC MOSFET inverter in rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2020(1): 28-33.
- [5] 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[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.
- [6] ANURAG A, ACHARYA S, KOLLI N, et al. Gate drivers for medium-voltage SiC devices[J]. IEEE journal of emerging and selected topics in industrial electronics, 2021, 2(1): 1-12. DOI: 10.1109/JESTIE.2020.3039108.
- [7] GUTIERREZ B, HOU Z M, JIAO D, et al. Gate driver design and device characterization for 3.3 kV SiC MOSFET modules[C]//2023 IEEE Energy Conversion Congress and

- Exposition, Nashville, 2023: 5983-5987. DOI: 10.1109/ECCE53617. 2023.10362206.
- [8] 李诚瞻, 周才能, 秦光远, 等. 轨道交通碳化硅器件研究进展[J]. 电子与封装, 2022, 22(6): 13-26.
- LI Chengzhan, ZHOU Caineng, QIN Guangyuan, et al. Recent advances in SiC devices for railway traction[J]. Electronics and packaging, 2022, 22(6): 13-26.
- [9] 孙康康, 陈燕平, 忻兰苑, 等. 3 300 V 全 SiC MOSFET 功率器件开关特性研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 34-37.
- SUN Kangkang, CHEN Yanping, XIN Lanyuan, et al. Research on switching characteristics of 3 300 V full SiC MOSFET power module[J]. Electric drive for locomotives, 2020(1): 34-37.
- [10] Mitsubishi Electric Corp. FMF750DC-66A[Z/OL]. [2023-02-16]. https://www.mitsubishielectric.com/cn/semiconductors/powerdevices/datasheets/sic/fmf750dc-66a_e.pdf.
- [11] Infineon Technologies AG. FF2000UXTR33T2M1[Z/OL]. [2024-04-16]. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF2000UXTR33T2M1-DataSheet-v01_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c8fc2dd9c018fe343fe205dbb.
- [12] Infineon Technologies AG. FF4000UXTR33T2M1[Z/OL]. [2024-07-05]. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF4000UXTR33T2M1-DataSheet-v01_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c919c9f9d01922dfcc81186c.
- [13] Infineon Technologies AG. FF450R33T3E3[Z/OL]. [2022-04-06]. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF4000UXTR33T2M1-DataSheet-v01_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c919c9f9d01922dfcc81186c.
- [14] Infineon Technologies AG. FZ1000R33HE3[Z/OL]. [2021-10-22]. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FZ1000R33HE3-DataSheet-v01_10-EN.pdf?fileId=db3a30431ce5fb52011d760f30227290.
- [15] 孙佳慧. 1 200 V SiC MOSFET 与 Si IGBT 的短路可靠性对比和分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- SUN Jiahui. Comparison and analysis of short circuit capability of 1 200 V SiC MOSFET and Si IGBT[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [16] 王旭东, 朱义诚, 赵争鸣, 等. 驱动回路参数对碳化硅 MOSFET 开关瞬态过程的影响[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 23-30.
- WANG Xudong, ZHU Yicheng, ZHAO Zhengming, et al. Impact of gate-loop parameters on the switching behavior of SiC MOSFETs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 23-30.
- [17] 巴腾飞, 李艳, 梁美. 寄生参数对 SiC MOSFET 栅源极电压影响的研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 64-73.
- BA Tengfei, LI Yan, LIANG Mei. The effect of parasitic parameters on gate-source voltage of SiC MOSFET[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13): 64-73.
- [18] 陈龙. 大功率 SiC MOSFET 器件特性与驱动保护研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- CHEN Long. Research on characteristics and driver protection of high power SiC MOSFET devices[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [19] 陈修林, 王三虎, 邹扬举. IGCT 门极驱动用高压隔离多输出电源的设计[J]. 控制与信息技术, 2025(2): 91-96.
- CHEN X L, WANG S H, ZOU Y J. Design of high-voltage isolation multi-output power supply for IGCT gate drive[J]. Control and Information Technology, 2025(2): 91-96.

Design and study of 3.3 kV SiC MOSFET drivers

XIN Lanyuan¹, LIN Zhenjun¹, CHEN Yanping¹, WANG Xiaonian¹, XU Shaolong²

(1. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: This paper analyzes the electrical characteristics of 3.3 kV SiC MOSFET drivers and reviews the studies on existing SiC drivers. Furthermore, it presents a design scheme for high-voltage SiC drivers, and highlights the key differences between SiC drivers and traditional IGBT drivers. A 3.3 kV SiC MOSFET digital driver with multi-stage soft turn-off capability was designed. Comprehensive functional verification and performance evaluation were carried out through double pulse tests, short-circuit tests and power tests. The test results validate that this driver features a high instantaneous drive current, low gate crosstalk, and rapid short-circuit protection response. The multi-stage soft turn-off function not only mitigates voltage stress but also shortens the turn-off time, enabling rapid turn-off.

Keywords: SiC MOSFET; driver; multi-stage soft turn-off