

基于源极电感检测法的SiC MOSFET 短路保护电路研究

李官军¹, 卢乙², 殷实¹, 余豪杰¹, 李先允², 殷帆²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210003;

2. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要:碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管(SiC MOSFET)凭借高工作温度、高开关频率和低导通损耗等优点,被广泛应用于高压、高温和高工作频率场合,但SiC MOSFET的短路耐受时间较小,仅为2~5 μs ,这对SiC MOSFET的短路保护电路提出了更高的要求。首先总结分析SiC MOSFET短路故障特性,然后基于源极电感检测法设计一款SiC MOSFET短路保护电路并简要分析其工作原理,最后搭建实验平台进行实验验证。实验结果表明,所设计的短路保护电路结构简单,当SiC MOSFET发生硬开关短路故障或负载短路故障时,保护电路能够在故障发生的1 μs 内关断器件,保证器件的安全运行。

关键词:碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管;短路特性;源极电感检测法;短路保护

中图分类号:TM13 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd21403

Research on Short-circuit Protection Circuit of SiC MOSFET Based on Source Inductance Detection

LI Guanjun¹, LU Yi², YIN Shi¹, YU Haojie¹, LI Xianyun², YIN Fan²

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, Jiangsu, China;

2. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu, China)

Abstract: Silicon carbide metal oxide semiconductor field effect transistor(SiC MOSFET) is extensively used in high voltage, high temperature, and high operation frequency applications due to the advantages such as high operating temperature, high switching frequency, and low conduction loss. However, the short-circuit withstand time of SiC MOSFET is short, only 2~5 μs , which puts forward higher requirements for the short-circuit protection circuit of SiC MOSFET. First, the SiC MOSFET short-circuit fault characteristics were summarized and analyzed. Then a SiC MOSFET short-circuit protection circuit was designed based on the source inductance detection method and the working principle was briefly analyzed. Finally, an experimental platform was established to verify the effectiveness of the designed short-circuit protection circuit. The experimental results show that the designed short-circuit protection circuit has a simple structure, and can turn off the device within 1 μs when the SiC MOSFET meets hard-switch short-circuit fault or load short-circuit fault to ensure the safe operation of the device.

Key words: silicon carbide metal oxide semiconductor field effect transistor (SiC MOSFET); short-circuit characteristics; source inductance detection method; short-circuit protection

与传统的Si MOSFET相比, SiC MOSFET凭借高工作温度、高开关频率和低导通损耗等优点,被广泛应用于如电机、逆变器、发电机等高压、高温和高工作频率场合,但是, SiC MOSFET

的栅极氧化物厚度较小,这降低了SiC MOSFET的可靠性,减小了其短路耐受时间,现有研究表明, SiC MOSFET的短路耐受时间仅为2~5 μs ,这对SiC MOSFET短路保护电路的响应时间和可靠

基金项目:江苏省储能变流及应用工程技术研究中心实验室开放基金(XNY1908005);江苏省重点研发计划(BE2018130);

江苏省普通高校研究生科研创新计划(SJCX19-0534)

作者简介:李官军(1982—),男,硕士,高级工程师,Email:8807117@qq.com

性提出了更高的要求^[1-3]。文献[4]基于 v_{ds} 检测法设计了一款SiC MOSFET短路保护电路,同时采用电容和电阻消除 v_{ds} 检测法存在的消隐时间,但是SiC MOSFET漏源极电压 v_{ds} 输出曲线会随着温度的变化而变化,因此 v_{ds} 检测法检测精度容易受到温度的影响。文献[5]基于栅极电压检测法设计了一款SiC MOSFET短路保护电路,该保护电路不存在消隐时间,且能在 $1\ \mu\text{s}$ 内完成保护动作,但是电路结构复杂且算法繁琐,不适宜推广使用。文献[6]基于PCB罗氏线圈设计了一款SiC MOSFET短路保护电路,能够在 $2\ \mu\text{s}$ 内完成保护动作,且不存在消隐时间,但是罗氏线圈的测量精度很容易受电磁干扰。

针对上述问题,本文首先总结分析SiC MOSFET短路故障特性,然后结合源极电感检测法设计一款SiC MOSFET短路保护电路并简要分析其工作原理,最后搭建实验平台进行实验验证,实验结果表明,设计的SiC MOSFET短路保护电路,结构简单,能够在器件发生硬开关短路故障和负载短路故障的 $1\ \mu\text{s}$ 内快速完成保护动作,确保器件的安全运行。

1 SiC MOSFET 短路特性

图1所示为SiC MOSFET短路特性测试电路原理图。图1中, V_{dc} 为母线直流电压,C为滤波电容,L为负载电感, L_{loop} 为电路回路中寄生电感, R_{stray} 为电路回路中杂散电阻。

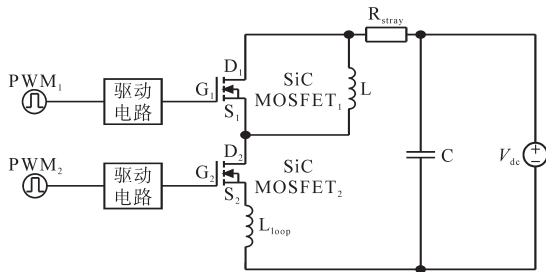


图1 测试电路

Fig.1 Test circuit

SiC MOSFET短路故障主要分为两类:硬开关短路故障(hard switching fault, HSF)和负载短路故障(fault under load, FUL)。HSF是指器件在导通之前就处于短路回路中,即器件一导通就立刻发生短路故障;FUL是指器件在正常工作状态下,负载发生短路故障。

图2、图3所示为两种短路故障情况下SiC MOSFET漏源极电压 v_{ds} 和漏极电流 i_d 波形。假设

短路保护电路的动作时间为 Δt ,发生短路故障时漏极电流上升速率相同,从图2、图3可以得出:器件发生负载短路故障时,由于电路已正常工作一段时间,器件中已流过较大电流,因此短路电流峰值要远大于硬开关短路故障电流峰值,但是硬开关短路故障的器件损耗要远大于负载短路故障,因此两种故障都需要快速的短路保护电路,以确保器件发生短路故障时不会损坏^[7-8]。

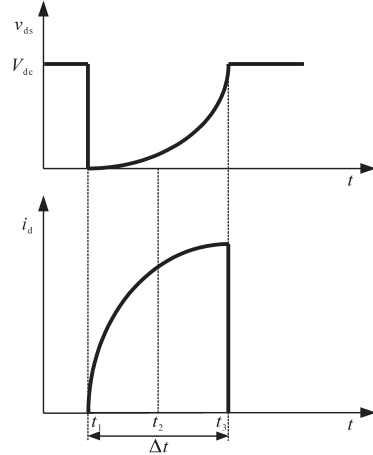


图2 HSF情况下电压、电流波形

Fig.2 Voltage and current waveforms in the case of HSF

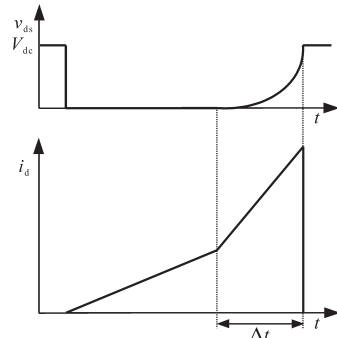


图3 FUL情况下电压、电流波形

Fig.3 Voltage and current waveforms in the case of FUL

以SiC MOSFET硬开关短路故障为例,介绍器件的短路特性,由图2可以看出,SiC MOSFET的硬开关短路故障可以分为3个阶段^[9-10]。

阶段1 $[t_1-t_2]$: t_1 时刻之前,SiC MOSFET处于关断状态, t_1 时刻器件导通并立刻发生短路故障,由于电路回路中阻抗较小,器件漏极电流 i_d 迅速上升,同时漏极电流 i_d 会在电路寄生电感 L_{loop} 和杂散电阻 R_{stray} 上产生压降,使得器件漏源极电压 v_{ds} 缓慢上升,该阶段内,器件结点温度逐渐上升。

阶段2 $[t_2-t_3]$:SiC MOSFET结点温度继续上升,如图4所示,器件导通电阻阻值随着结点温度的上升而增加,随着器件导通电阻阻值的增加,漏极电流 i_d 的上升速率降低。

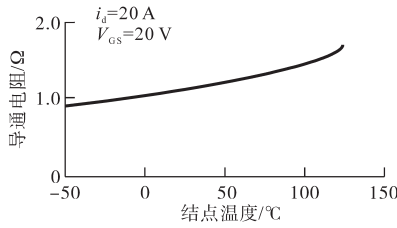


图4 导通电阻与结点温度的关系

Fig.4 Relationship between on-resistance and junction temperature

阶段3[$t_3-\infty$]: t_3 时刻,器件关断,漏极电流 i_d 逐渐下降并减小至零,器件漏源极电压 v_{ds} 上升至母线直流电压 V_{dc} 。

2 过流保护电路设计

目前SiC MOSFET短路保护电路中所选用的检测方法主要有:分流器检测法、门极电压检测法、 v_{ds} 检测法、罗氏线圈检测法和源极电感检测法,表1汇总了各种检测方法的优缺点^[6-7]。

表1 各检测方法优缺点

Tab.1 Advantages and disadvantages of detection methods

检测方法	优点	缺点
分流器检测法	电路简单,响应速度快	增加电路损耗
门极电压检测法	响应速度快	电路复杂
v_{ds} 检测法	电路简单	存在消隐时间
罗氏线圈检测法	响应速度快	测量精度易受电磁干扰
源极电感检测法	电路简单,响应速度快	适用范围窄

为了确保短路保护电路的快速响应性和可靠性,本文基于源极电感检测法设计保护电路,图5为本文设计的SiC MOSFET短路保护电路原理图,主要包括驱动电路、采样电路和脉冲产生电路三个部分。

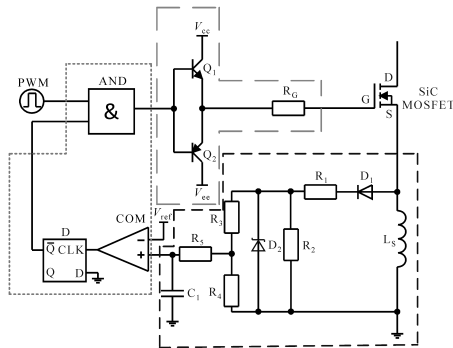


图5 保护电路原理图

Fig.5 Protection circuit schematic

1)驱动电路:由开关管 Q_1, Q_2 和驱动电阻 R_6 组成,开关管 Q_1, Q_2 构成图腾柱结构,用于产生SiC MOSFET开关所需的驱动电压,也可用专用驱动芯片替代。

2)采样电路:由电感 L_s 、电阻 $R_1\sim R_5$ 、二极管 D_1 、钳位二极管 D_2 和电容 C_1 组成,电感 L_s 串联于SiC MOSFET器件源极,采样电路并联于 L_s 两端,其中电阻 R_2 和钳位二极管 D_2 组成电压钳位电路,以防止采样电压值过大损坏逻辑芯片,采样电压经电阻 R_3, R_4 分压后,通过电阻 R_5 对电容 C_1 进行充电,电容 C_1 同时起到滤波的作用。本文中选取 $L_s=20\text{ nH}, R_1=R_2=510\ \Omega, R_3=10\text{ k}\Omega, R_4=50\text{ k}\Omega, R_5=1\text{ k}\Omega, C_1=10\text{ pF}$ 。

3)脉冲产生电路:由电压比较器、D型触发器和“与”逻辑门组成,采样电压通过电阻 R_5 对电容 C_1 进行充电,当 C_1 中电压超过参考电压 V_{ref} 时,电压比较器发出高电平,此时D型触发器CLK端接收脉冲由低电平转为高电平,因此 \bar{Q} 输出端的输出脉冲由高电平转为低电平并保持不变,“与”逻辑门输出被锁定为低电平,并将SiC MOSFET栅极电压强制拉至低电平以关断器件。

表2总结了电路中各器件和RC电路所引起的延时。

表2 电路延时

Tab.2 Delay of the circuit

器件	选型	引发延时/ns
电压比较器	MAX9203ESA+	7
D型触发器	74LVC1G80	6.5
“与”逻辑门	MC74VHC1GT08	3.5
驱动芯片	IXDN609SI	95
RC电路	无	20

3 实验验证

采用图6所示测试电路对所设计的SiC MOSFET短路保护电路进行实验验证,为了防止实验过程中SiC MOSFET短路损坏,在电路回路中增加小阻值电阻 R_{pro} 。

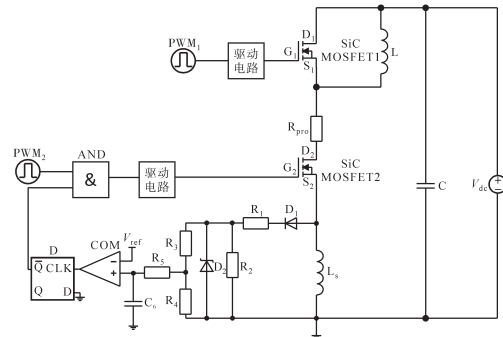


图6 测试电路

Fig.6 Test circuit

根据图6所示测试电路原理图搭建图7所示

实验平台。



图7 实验平台

Fig.7 Experimental platform

图7中,示波器为Tektronix公司的DPO4054B,电压探头为TPP0500, P5205A 和 THDP0200,电流探头为TCP0030A,触发脉冲信号由DSP发出, SiC MOSFET采用CREE公司的C2M0040120D,其耐压为1 200 V,可持续工作电流为60 A,导通电阻为0.04 Ω。

为了测试所设计保护电路实际效果,进行两组实验,分别模拟 SiC MOSFET 发生硬开关短路故障和负载短路故障,图8为两组实验上、下开关管触发脉冲波形。

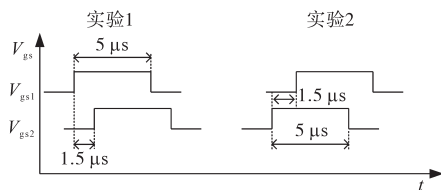


图8 开关管触发脉冲

Fig.8 Switching tube trigger pulse

图9、图10分别为实验1、实验2的测试波形。

通过图9、图10可以得出:当 SiC MOSFET 发生硬开关短路故障或负载短路故障时,器件漏电流 i_d 迅速上升,所设计的短路保护电路能够在 1 μs 内关断器件,完成保护动作,确保器件的安全运行。

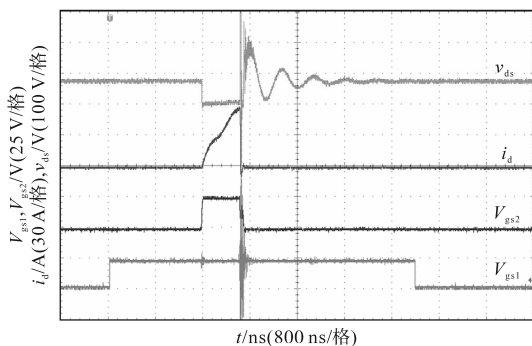


图9 实验1测试波形

Fig.9 Test waveforms of experiment 1

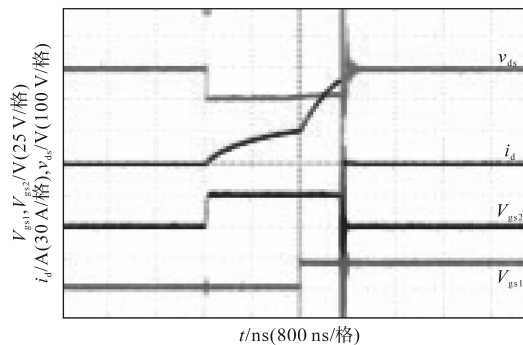


图10 实验2测试波形

Fig.10 Test waveforms of experiment 2

4 结论

本文基于源极电感检测法设计一款 SiC MOSFET 短路保护电路并对其进行实验验证。实验结果表明,当 SiC MOSFET 发生硬开关短路故障或负载短路故障时,所设计的短路保护电路均能在 1 μs 内关断器件,完成保护动作,确保器件的安全可靠运行,同时,所设计的保护电路结构简单,能够应用于各种 SiC MOSFET。

参考文献

- [1] Sun Jiahui, Wei Jin, Zheng Zheyang, *et al.* Short circuit capability and short circuit induced V_{TH} [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(3): 1539-1546.
- [2] 邹世凯,胡冬青,黄仁发,等. SiC MOSFET 驱动电路设计与实验分析[J].电气传动,2017,47(9):59-63.
- [3] 彭咏龙,江涛,李亚斌,等. SiC MOSFET 高频感应加热电源系统研究[J].电气传动,2017,47(3):70-73.
- [4] Zhang Xuan, Li He, Brothers J A, *et al.* A gate drive with power over fiber-based isolated power supply and comprehensive protection functions for 15 kV SiC MOSFET[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(3):946-955.
- [5] Takeshi Horiguchi, Shin-ichi Kinouchi, Yasushi Nakayama, *et al.* A fast short-circuit protection method using gate charge characteristics of SiC MOSFETs[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015: 20-24.
- [6] 张经纬,李晓辉,谭国俊.基于PCB罗氏线圈的SiC MOSFET 短路保护研究[J].电力电子技术,2017,51(8):26-29.
- [7] 吴海富,张建忠,赵进,等. SiC MOSFET 短路检测与保护研究综述[J].电工技术学报,2019,34(21): 4519-4528.
- [8] Nguyen Thanh-That, Ahmed Ashraf, Thang T V, *et al.* Gate oxide reliability issues of SiC MOSFETs under short-circuit operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5):2445-2455.

(下转第24页)

载对输出负载电流(满载、3/4载、半载、1/4载)进行设定,通过功率分析仪来测试输入电流、输入

功率因数和总电流谐波,所得高低压输入时,样机测试数据如表1所示。

表1 样机测试数据(平均效率、功率因数、总电流谐波)

Tab.1 Prototype test data(average efficiency, PF, THD)

AC输入电压/V	频率/Hz	输入电流/A	输入功率/W	输入电流设定/A	输出电压测量/V	输出功率计算/W	功率因数	转换效率/%	总电流谐波THD/%	平均效率/%
115.0	60.0	0.896	103.30	4.620	19.43	89.79	1.00	86.92	0.12	86.054
115.0	60.0	0.671	77.35	3.463	19.52	67.60	1.00	87.40	0.12	
115.0	60.0	0.449	51.67	2.308	19.60	45.25	1.00	87.58	0.11	
115.0	60.0	0.233	26.57	1.153	19.68	22.70	0.99	85.43	0.12	
230.0	50.0	0.451	103.20	4.622	19.43	89.80	0.99	87.02	0.14	85.076
230.0	50.0	0.346	78.20	3.463	19.51	67.58	0.98	86.42	1.40	
230.0	50.0	0.241	53.10	2.310	19.60	45.28	0.95	85.27	1.91	
230.0	50.0	0.154	28.59	1.153	19.68	22.69	0.80	79.38	1.21	

测试数据经分析计算可知,样机带1/4载到满载,负载调整率小于1%,输入高/低压供电(230 V/115 V),平均效率分别为85.076%和86.054%,总平均功率大于85%,低压满载功率因数PF>0.99,低压电流总谐波畸变THD<0.2。

5 结论

文中依据需满足的功率因数校正和输出电压需求,阐述了采用两级结构设计及其理论根据。前级采用Boost电路对功率因数进行校正设计,后级采用Flyback拓扑实现DC/DC变换输出。依据设计规格,用工程设计方法,详细阐述了变换器中的核心磁性元件PFC电路中电感参数和DC-DC反激变换器变压器参数的设计过程及其参数选择的理论依据。样机测试验证功率密度可达0.509/cm³,测试平均效率大于85%,低压功率因数PF>0.99,低压电流总谐波THD<0.2,满足高功率密度、高效率和高功率因数与电流谐波标准要求,论证了设计过程的合理性和工程实用性。该设计方案可供开关电源磁性元件设计参考,用以提高产品开发效率,降低设计风险。

参考文献

[1] 谢兴菊. 90 W笔记本电脑电源适配器的研究与设计[D]. 广州:华南理工大学,2010.

[2] 黄海宏,陈志强. 高功率因数整流电路综述[J]. 电器与能效管理技术,2019(16):1-9.

[3] 杜常清,潘志强,赵奕凡,等. 电动汽车车载充电系统研究[J]. 电源技术,2016,40(6):1277-1279,1329.

[4] yuguang. 漫谈系列之一——漫谈PFC的原理与实现[EB/OL]. 世纪电源网,2012[2012-8-22]. <http://bbs.21dianyuan.com/thread-105789-1-1.html>.

[5] 刘红丽,马正来,聂鹏. 4 kW电动汽车车载充电机的研究与实现[J]. 电气传动,2017,47(2):20-23,42.

[6] 孙前刚,沙亮,刘刚. 基于NCP1605G的大功率LED驱动电源的PFC电路设计[J]. 电源学报,2016,14(5):76-81.

[7] 徐攀,邱瑞昌,柳宇航,等. 基于Boost拓扑的双重PFC系统的设计[J]. 电源技术,2016,40(3):652-654.

[8] 张卫平,王柏樟,张晓强. 两种CCMPFC控制器的研究[J]. 电源学报,2016,14(5):7-14.

[9] Networkpower. CCM BOOST PFC电路设计浅析[EB/OL]. 世纪电源网,2010[2010-8-6]. <http://bbs.21dianyuan.com/thread-21585-1-1.html>.

[10] 文天祥,符致华. 开关电源工程化设计与实践[M]. 北京:机械工业出版社,2019.

[11] 万其明,蔡教武. 一种LED灯驱动电源功率因数校正变换器的设计[J]. 照明工程学报,2019,30(5):119-125.

[12] 张厚升. 新型反激式变压器及其缓冲电路设计[J]. 电气传动,2010,40(11):49-52.

[13] 孟天星,张厚升. 一种实用新型反激式开关电源[J]. 电气传动,2014,44(9):40-44.

收稿日期:2020-02-09
修改稿日期:2020-03-16

(上接第19页)

[9] Qin Haihong, Dong Yaowen, Xu Kefeng, et al. A comprehensive study of the short-circuit characteristics of SiC MOSFETs [C]//2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA),2017: 18-20.

on hard-switching condition[C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS), 2018:7-10.

收稿日期:2020-01-17
修改稿日期:2020-03-03