

SiC MOSFET及Si IGBT串联短路动态特性研究

张甜,宋明轩,冯源,何凤有

(中国矿业大学 电气与动力工程学院,江苏 徐州 221000)

摘要:针对因器件击穿、控制失效等问题导致的串联短路现象,基于半桥结构分析了SiC MOSFET及Si IGBT不同的串联短路动态分压特性。同时,结合开关过程中电压、电流的变化分析串联短路分压原理,并在输出特性曲线上标注器件的分压路径。实验结果表明,驱动电压、负载电流、母线电压等外部驱动参数对两种器件串联短路分压特性的影响不同,其中反向负载电流改变了串联短路的分压趋势且对串联短路特性影响最大。充分认识器件的串联短路机理对改进短路保护具有现实意义。

关键词:碳化硅MOSFET;硅IGBT;串联短路

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd23827

Dynamic Characterization Study on Series Short-circuit of SiC MOSFET and Si IGBT

ZHANG Tian, SONG Mingxuan, FENG Yuan, HE Fengyou

(School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221000, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the series short-circuit phenomenon caused by device breakdown and control failure, based on the half-bridge structure, the different series short-circuit dynamic sharing voltage characteristics of SiC MOSFET and Si IGBT were analyzed. At the same time, the principle of series short-circuit voltage sharing was analyzed combining with the changes of voltage and current during switching, and the voltage sharing path of the device was marked on the output characteristic curves. Experimental results show that the external driving parameters such as driving voltage, load current and bus voltage have different effects on the voltage sharing characteristics of the two devices on series short-circuit. The reverse load current changes the series short-circuit voltage sharing trend and most obviously effects the characteristics of series short-circuit. Fully understanding the series short-circuit mechanism is critical to improve the short-circuit protection strategies.

Key words: silicon carbide metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (SiC MOSFET); silicon insulated gate bipolar transistor (Si IGBT); series short-circuit

近年来SiC MOSFET和Si IGBT不断向高功率密度和高可靠性方向发展,以其优异的性能在以电力电子变换器为代表的高压大功率场合得到了广泛的应用。然而短路仍然是威胁系统安全不可忽视的问题,学者们主要从内部失效机理^[1-2]、热特性^[3]、短路特性^[4]、保护电路^[5-7]等多个维度出发,在短路方面做了很多研究,在通过实验了解其短路特性的同时分析内部热和载流子的变化,从而改进保护电路。目前在多电平系统运行过程中因硬件电路缺陷、控制失误等问题使某

一器件误导通时,存在多个器件处在电流回路中的复杂串联短路现象,因此分析单个器件短路特性得到的结论不足以支撑复杂电力电子装置的保护策略。文献[8]分析了SiC MOSFET串联短路动态特性,在此基础上本文基于半桥结构详细分析SiC MOSFET和Si IGBT的串联短路动态特性,并对两种器件在短路分压过程中表现出的不同现象进行讨论,在负载电流为0 A时, SiC MOSFET出现均压现象,而Si IGBT有一个器件承受较大电压。

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX212229)

作者简介:张甜(1998—),女,硕士研究生,Email:TS19130229P31@cumt.edu.cn

1 器件特性分析

图1为SiC MOSFET和Si IGBT输出特性曲线。SiC MOSFET栅极达到阈值电压后导通,沟道电流随着漏源电压的增加线性增大,此时SiC MOSFET呈电阻性,随着漏源电压 V_{DS} 增大,器件逐渐进入饱和区。Si IGBT集射极电压增大,器件从截止区进入饱和区。查阅器件手册Si IGBT驱动电压为15 V, SiC MOSFET栅极驱动电压为18~22 V,根据图1所示,栅极电压增加,器件的饱和电流增大。发生短路时流过器件的短路电流是额定电流的数倍,产生的热量在较短时间内无法通过封装消散,加剧了器件的老化和损坏。在工业上对SiC MOSFET和Si IGBT保护时间的要求不同, Si IGBT为8 μ s, SiC MOSFET的要求较高,为3 μ s,重复短路试验后特性退化等不稳定性因素成为SiC MOSFET不能在相关领域应用的重要原因。因此, SiC MOSFET面临的短路问题更加严峻。

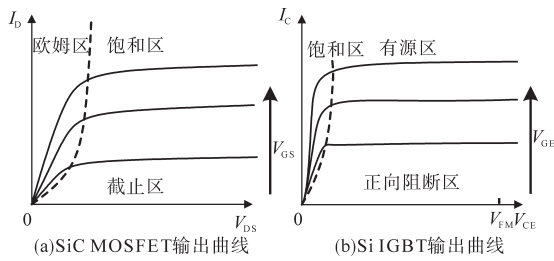


图1 输出特性曲线图

Fig.1 Output characteristic curves

2 串联短路原理和分析

2.1 串联短路动态分压原理

单个器件短路时几乎承受全母线电压,而两个器件发生串联短路时存在分压现象。图2为SiC MOSFET及Si IGBT半桥结构串联短路原理图,其中 T_1 、 T_2 为待测器件SiC MOSFET或Si IGBT; V_{DC} 为母线直流电压; L_s 为杂散电感; L_{load} 为感性负载; I_L 为流过负载 L_{load} 的正向电流; T_1 、 T_2 由MOSFET器件 $M_{P,x}$ 、 $M_{N,x}$ 组成的推挽电路驱动,驱动信号为 $V_{G,x}$, x 取1和2分别为 T_1 、 T_2 的驱动参数; V_x 为推挽电路提供电压; $R_{on,x}$ 、 $R_{off,x}$ 分别为开通电阻和关断电阻; $R_{gin,x}$ 为栅极电阻。

图3为SiC MOSFET和Si IGBT在负载电流为0 A时的串联短路波形示意图。当 T_1 处于正常导通状态时, T_2 因某种原因误导通,形成串联短路,短路电流 I_{sh} 快速增大,在此过程中 T_1 、 T_2 上的电压发生变化,经过一段时间后 T_1 、 T_2 同时关断。

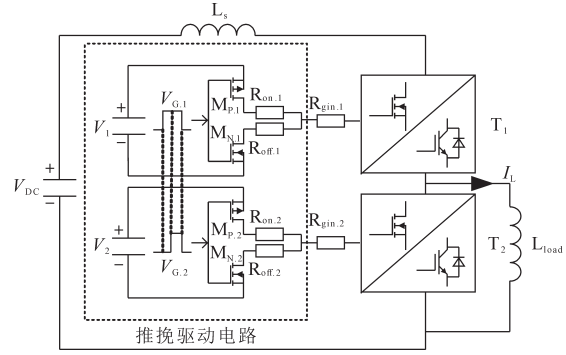


图2 SiC MOSFET及Si IGBT串联短路原理图

Fig. 2 Principle of SiC MOSFET and Si IGBT on series short-circuit

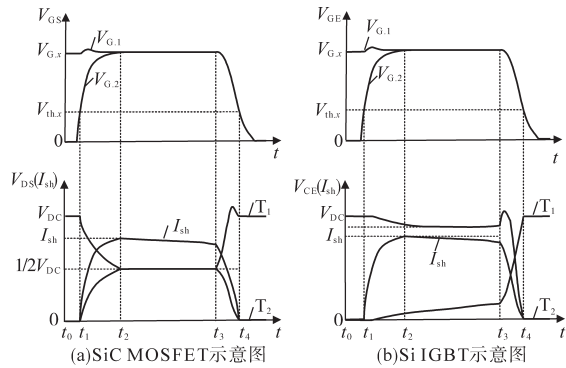


图3 SiC MOSFET及Si IGBT串联短路波形示意图

Fig.3 Waveforms diagram of SiC MOSFET and Si IGBT on series short-circuit

2.2 动态分压过程分析

T_1 、 T_2 串联短路共分为四个阶段: T_1 正常工作阶段 $[t_0-t_1]$ 、短路电流上升阶段 $[t_1-t_2]$ 、短路分压阶段 $[t_2-t_3]$ 、关断阶段 $[t_3-t_4]$ 。在忽略温度的影响、负载电流为0 A且 T_1 、 T_2 驱动参数相同的理想条件下对串联短路原理进行分析。

2.2.1 T_1 正常工作阶段 $[t_0-t_1]$

在 T_2 未导通之前, T_1 处在正常工作状态, 通态压降很小, T_2 几乎承受全母线电压。

2.2.2 电流上升阶段 $[t_1-t_2]$

T_1 、 T_2 形成串联短路后, 短路电流迅速上升。在杂散电感 L_s 上产生压降, T_2 的电压缺口 ΔV_{T2} 为

$$\Delta V_{T2} = L_s \frac{dI_{sh,1}}{dt} \quad (1)$$

短路时, 流过SiC MOSFET的电流和 T_2 栅极电压为

$$I_{sh,x} = A(V_{G,x} - V_{th,x})^2(1 + \lambda V_{DS,x}) \quad (2)$$

$$V_{GS,2} = V_{th,2} + (V_{G,2} - V_{th,2})[1 - e^{-(t_2 - t_1)/\tau_1}] \quad (3)$$

短路时, 流过Si IGBT的电流和 T_2 门极电压为

$$I_{sh,x} = A \frac{1}{1 - \alpha_{PNP}} (V_{G,x} - V_{th,x})^2 \quad (4)$$

$$V_{GE,2} = V_{th,2} + (V_{G,2} - V_{th,2})[1 - e^{-(t_2 - t_1)/\tau_1}] \quad (5)$$

其中

$$A = \frac{\mu_{ni} W_{ch} C_{ox}}{2L_{ch}}$$

式中: L_{ch} 为沟道长度; μ_{ni} 为沟道载流子迁移速率; W_{ch} 为沟道宽度; C_{ox} 为栅氧化层等效电容; λ 为SiC MOSFET沟道夹断系数; α_{PNP} 为Si IGBT的PNP晶体管共基极放大系数; τ_1, τ_2 分别为SiC MOSFET和Si IGBT栅极时间常数。

L_{ch}, C_{ox} 为器件参数, μ_{ni}, α_{PNP} 和 $V_{th,x}$ 与温度相关。

2.2.3 短路分压阶段 $[t_2-t_3]$

按照短路类型分类,发生串联短路时 T_1 属于二类短路, T_2 属于一类短路^[4]。 t_2 时刻短路电流达到峰值,受结温影响短路电流达到饱和后呈下降趋势。此时 T_1 和 T_2 都处在导通状态,母线电压由 T_1 和 T_2 共同承担。发生串联短路后,SiC MOSFET和Si IGBT出现动态分压现象, T_1, T_2 在输出特性曲线上的路径变化如图4所示, t, t' 分别代表待测器件 T_1 和 T_2 的时间。

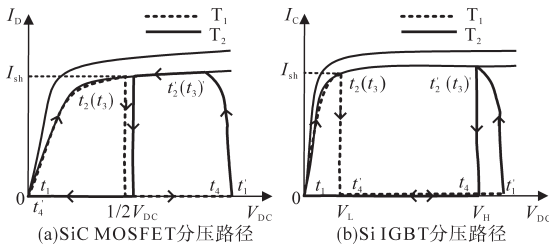


图4 T_1, T_2 串联短路分压路径

Fig.4 The voltage sharing path of T_1 and T_2

SiC MOSFET的电压可表示为

$$\begin{cases} V_{T1} = \frac{I_L + \lambda A b_2 V_{DC} - A(b_1 - b_2)}{\lambda A(b_1 + b_2)} \\ V_{T2} = \frac{-I_L + \lambda A b_1 V_{DC} + A(b_1 - b_2)}{\lambda A(b_1 + b_2)} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $b_x = A(V_{G,x} - V_{th,x})^2$

驱动电压不变时,式(6)可简化为

$$\begin{cases} V_{T1} = \frac{I_L}{2b_1 \lambda A} + \frac{V_{DC}}{2} \\ V_{T2} = -\frac{I_L}{2b_1 \lambda A} + \frac{V_{DC}}{2} \end{cases} \quad (7)$$

因此当负载电流为0 A时,SiC MOSFET串联短路具有均压现象,从图1可以看出,SiC MOSFET的饱和电流随 V_{DS} 的增加而增大,所以SiC MOSFET具有分压特性。Si IGBT输出特性曲线低电压侧有明显的饱和区和线性区,受MOSFET沟道效应以及PNP晶体管调制效应的影响,在高压侧饱和电流有所抬升,但变化远不如SiC MOS-

FET明显,可以忽略不计。在分压阶段,Si IGBT其中一个器件承受了大部分母线电压,需要经过远长于短路保护的时间才会达到均分电压的效果,因而可以认为Si IGBT不具有均压特性,且电压保持在较小的变化范围内。随着短路电流的增大, T_1 漏源极电压大幅下降, T_2 漏源极电压大幅上升,最终在 $V_{DC}/2$ 附近保持稳定。Si IGBT的 T_1 集射极承受较小的电压 V_L , T_2 集射极承受较高的电压 V_H ,分压结束后 T_1, T_2 分别在 V_L, V_H 处趋于稳定。

2.2.4 关断阶段 $[t_3-t_4]$

短路电流的急剧下降使杂散电感 L_s 产生感应电势, T_1 和 T_2 形成过压尖峰 ΔV_{pk} :

$$\Delta V_{pk} = \frac{1}{2} L_s \frac{dI_{sh}}{dt} \quad (8)$$

3 实验分析

在实际运行过程中, T_1 和 T_2 负载电流、母线电压、驱动电压改变时形成了不同的串联短路分压特性。本文采用ROHM公司的SiC MOSFET SCT3105KLHR(1 200 V, 24 A)和Si IGBT RGS50TSX2DHR(1 200 V, 25 A)进行实验。依据器件特性和短路保护选择的短路时间应满足串联短路特性明显而稳定、可重复实验两个要求。因此设定SiC MOSFET短路时间为3 μs , Si IGBT短路时间为7 μs 。

3.1 负载电流对分压特性的影响

由电感的特性知,负载 L_{load} 越大,负载电流受母线电压、驱动电压等外部电路参数的影响越小。流经 T_1, T_2 的短路电流关系为

$$I_{sh,1} = I_L + I_{sh,2} \quad (9)$$

电流流过负载的方向不同时, T_1 和 T_2 串联短路分压特性发生变化。图5为正向负载电流分别为10 A和20 A的串联短路分压波形,SiC MOSFET和Si IGBT在分压过程中 T_1 承受更多的母线电压, T_1 电压从0 V上升至超过50%母线电压, T_2 电压从 V_{DC} 降至50%母线电压以下,二者电压出现交叉,且交叉点在50%母线电压附近。当流过 T_1 的短路电流不变,负载电流增大时,由式(9)可知流过 T_2 的短路电流减小。由图1可知,在同一驱动电压下,器件承受的电压随着电流的增加而上升,因此 T_1 承受的短路稳态电压上升, T_2 对应的短路稳态电压下降,二者的短路分压完成时间 t_2 提前。

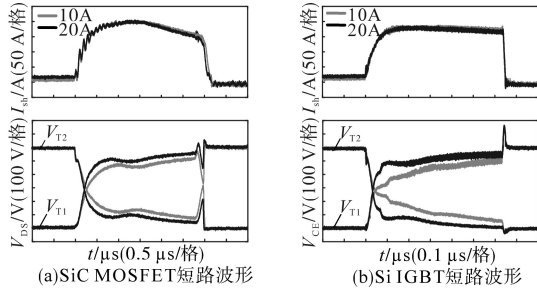


图5 不同正向负载电流下的短路波形

Fig.5 Waveforms of different positive load currents on series short-circuit

图6为反向负载电流-10 A和-20 A的串联短路分压波形,当负载电流反向增大时,由式(7)、式(9)可知流过SiC MOSFET T_2 的短路电流增大, T_2 承担较大的电压, T_1 和 T_2 上的电压无交叉。根据Si IGBT的输出特性分析,其电压保持在较小的变化范围内,因此相比SiC MOSFET, Si IGBT器件 T_2 分担更大的电压。

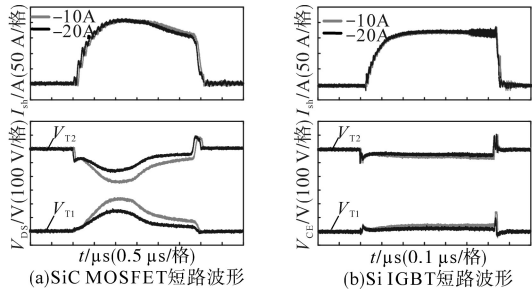


图6 不同反向负载电流下的短路波形

Fig.6 Waveforms of different negative load currents on series short-circuit

3.2 母线电压对分压特性的影响

母线电压400 V和600 V的串联短路波形如图7所示。SiC MOSFET在50%母线电压附近均压,Si IGBT的 T_2 始终承受较大电压。对于SiC MOSFET,母线电压的增大使分压的过程变长,即分压完成时刻 t_2 延后。当母线电压过小时, T_1 , T_2 漏源极电压在短路电流上升过程中已经达到50%母线电压,分压提前结束。对于Si IGBT,随着母线电压的增大, T_1 分担电压增大。

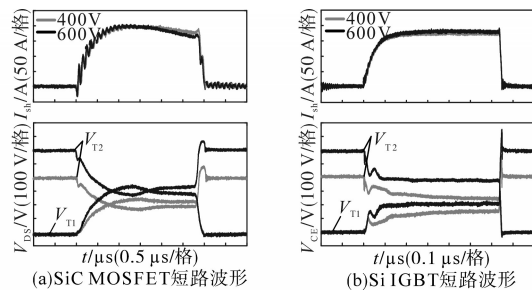


图7 不同母线电压下的串联短路波形

Fig.7 Series short-circuit waveforms under different bus voltages

3.3 驱动电压对分压特性的影响

图8为不同驱动电压下的串联短路分压波形。驱动电压增大加快了电流上升速率,增大了短路电流峰值。SiC MOSFET驱动电压从18 V上升至20 V时,短路电流增加,因为驱动电阻和电容参数不变,短路电流达到峰值的时间不变。电流上升速率加快使 T_1 , T_2 漏源极电压下降加快,分压完成时刻 t_2 提前。Si IGBT驱动电压从14 V上升至15 V时,短路电流增大, T_2 始终分担更大的电压,且随着门极电压的增大, T_1 分担电压减小。

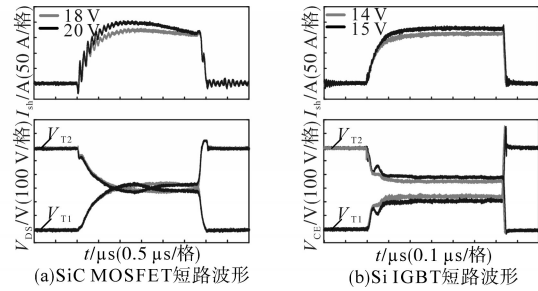


图8 不同驱动电压下的串联短路波形

Fig.8 Series short-circuit waveforms under different driving voltages

3.4 串联短路损耗分析

随着短路时间的增加,损耗增加,结温上升,负温度相关的声子散射机制影响比重增加,进而使短路电流下降。Si IGBT为双极性器件,在电流增加时,电导调制效应中和一部分电流。因此与Si IGBT相比,SiC MOSFET短路电流下降趋势更为明显。SiC MOSFET和Si IGBT短路损耗如表1和表2所示,SiC MOSFET均压较为明显, T_1 , T_2 的短路损耗相差较小。Si IGBT始终由 T_2 承担较大电压,损耗较大。短路损耗随着短路电流的下降而降低,与Si IGBT相比SiC MOSFET每个器件的损耗较小,每个器件承受的短路冲击较低。随着负载电流正向增大, T_1 损耗增大,负载电流反向增大, T_1 损耗减小。

表1 SiC MOSFET不同参数下的短路损耗

Tab.1 Short-circuit loss of SiC MOSFET under different parameters

V_{DS}/V	V_{GS}/V	I_L/A	E_{T1}/mJ	E_{T2}/mJ
600	20	10	239.174	72.126
		20	264.213	49.548
		-10	75.911	241.908
		-20	41.768	270.022
	18	0	143.090	170.753
		0	115.619	169.368
400	20	0	109.900	109.956

表2 Si IGBT不同参数下的短路损耗

Tab.2 Short-circuit loss of Si IGBT under different parameters

V_{CE}/V	V_{GE}/V	I_L/A	E_{T1}/mJ	E_{T2}/mJ
600		10	412.360	221.028
		20	544.150	89.238
		-10	36.290	579.098
		-20	16.665	616.723
	15	0	221.028	412.360
		14	227.259	355.170
400	15	0	140.176	271.768

4 结论

本文基于SiC MOSFET和Si IGBT半桥结构,结合理论和实验详细分析了串联短路动态分压特性。在发生串联短路时,上下桥臂分压的大小、分压完成时间随电路参数的改变而变化。承担较高电压的器件损耗较大,关断时有过压击穿的风险。然而结温是SiC MOSFET和Si IGBT在短路时不可忽略的影响因素,短路电流受结温影响呈下降趋势,短路电流的变化对器件分压影响较为明显,应进一步研究温度对串联短路的影响。

参考文献

- [1] Zhou Yuming, Liu Hangzhi, Mu Shilu, *et al.* Short-circuit failure model of SiC MOSFET including the interface trapped charges[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(1): 90-98.
- [2] 康建龙,辛振,陈建良,等.SiC MOSFET短路失效与退化机理研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 1069-1084.
- Kang Jianlong, Xin Zhen, Chen Jianliang, *et al.* Review and

prospect of short-circuit failure and degradation mechanism of SiC MOSFET[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1069-1084.

- [3] 邵伟华,冉立,曾正,等.SiC MOSFET短路特性评估及其温度依赖性模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2121-2131, 2227.
- Shao Weihua, Ran Li, Zeng Zheng, *et al.* Short-circuit evaluation and temperature-dependent model of SiC MOSFET[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2121-2131, 2227.
- [4] 秦海鸿,徐克峰,王丹,等.SiC MOSFET短路特性[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(3): 348-354.
- Qin Haihong, Xu Kefeng, Wang Dan, *et al.* Short-circuit characteristics of SiC MOSFETs[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(3): 348-354.
- [5] 王占扩,童朝南,黄伟超.SiC MOSFET短路特性及过流保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5751-5760.
- Wang Zhankuo, Tong Chaonan, Huang Weichao. Research on short-circuit characteristics and overcurrent protection of SiC MOSFET[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5751-5760.
- [6] 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.
- Wu Haifu, Zhang Jianzhong, Zhao Jin, *et al.* Review of short-circuit detection and protection of silicon carbide MOSFETs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(21): 4519-4528.
- [7] 李凯.高稳定性IGBT驱动器保护电路[J]. 电气传动, 2020, 50(6): 98-102.
- Li Kai. High stability IGBT driver protection circuit[J]. Electric Drive, 2020, 50(6): 98-102.
- [8] 张经纬,张甜,冯源,等.SiC MOSFET串联短路动态特性[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2446-2458.
- Zhang Jingwei, Zhang Tian, Feng Yuan, *et al.* Dynamic characterization assessment on series short-circuit of SiC MOSFET[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2446-2458.

收稿日期:2021-07-12

修改稿日期:2021-08-26