

抑制 SiC MOSFET 桥臂串扰的驱动电路 仿真分析与比较

李辉, 黄樟坚, 廖兴林, 谢翔杰

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044)

Simulation Analysis and Comparison of SiC MOSFET Driving Circuit for Suppressing Crosstalk Suppression in Bridge Arm

LI Hui, HUANG Zhangjian, LIAO Xinglin, XIE Xiangjie

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University),
Shapingba District, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: Due to the influence of high switching speed and parasitic parameters, the traditional driving circuit of SiC MOSFET would cause bridge crosstalk. In this paper, several typical crosstalk suppression driver circuits were studied, and analyzed their driving characteristic. Firstly, the paper described the principles of bridge crosstalk and the suppression methods of the typical gate drive circuits, which can provide reference for the improvement and optimization of crosstalk suppression driver design. Secondly, this paper analyzed the working principle of the typical gate drive circuits, established the simulation models and compared their driving characteristics. The results showed that the existing typical crosstalk suppression driving circuits mostly have such problems as extending the switching delay, increasing switching losses, improving the complexity of control and suppressing the peak value of voltage one-way.

KEY WORDS: SiC MOSFET; bridge crosstalk; simulation analysis; driving characteristics

摘要: 针对 SiC MOSFET 传统驱动电路受高开关速度及寄生参数影响而产生桥臂串扰现象的问题, 本文对现有几种典型抑制串扰驱动电路进行研究, 并对比分析其驱动特性, 为改进与优化抑制串扰驱动设计提供参考依据。首先, 论文阐述了桥臂串扰现象产生机理及几种典型抑制串扰驱动方法。其次, 分析了不同典型抑制串扰驱动电路的工作原理, 建立了不同驱动电路的仿真模型, 并比较其驱动特性。结果表明, 现有典型抑制串扰驱动电路存在增长开关延时, 增大开关损耗, 增加控制复杂程度和单向抑制电压峰值等问题。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(106112016CDJZR158802); 国家自然科学基金项目(51377184, 51607016)。

Project Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities(106112016CDJZR158802); National Natural Science Foundation of China (51377184, 51607016).

关键词: SiC MOSFET; 抑制串扰; 仿真分析; 驱动特性

1 引言

近年来, 以碳化硅(Silicon Carbide, SiC) MOSFET为代表的宽禁带半导体器件因其具有高开关频率、高开关速度、高击穿场强、高热导率等优异的物理特性, 成为了高频、高温、高功率密度驱动的理想器件选择^[1-5]。然而在桥式变换器中, SiC MOSFET的高开关速度特性在提高开关频率、降低开关损耗、缩短死区时间的同时, 受器件寄生参数的影响, 会产生桥臂中一个器件的快速开断导致与之互补的另一个器件栅源电压振荡的串扰现象^[6,7]。由于SiC MOSFET正向阈值电压与最大关断负压较小, 栅源电压振荡可能导致器件误导通或超过负压最大值。因此, 如何抑制桥式电路中的串扰现象对提高SiC MOSFET器件工作可靠性、延长器件使用寿命具有重要意义。

目前, 已有一些文献对如何抑制串扰现象展开研究, 其主要方法分为两类。一类是控制栅极驱动阻抗的抑制方法, 文献[8]通过反接二极管电路, 并在栅源之间并联电容来抑制串扰, 虽然此方法简单地抑制了栅极振荡, 但却增大了开关延时与损耗; 文献[9]提出在米勒平台期增大驱动电阻的方法有一定的抑制效果, 但却很难准确监测开关状态是否处于平台期。另一类是负压关断的抑制方法, 文献[10]采用负压关断的方法有效抑制了正向峰值, 但同时减小了负压裕量, 容易引起负压过限; 文献[11]在栅源间并联稳压二极管钳位电路, 但是由于稳压状态下二极管的额定电流很小, 在没有限流电

阻的情况下很难达到较好地稳压效果;文献[12, 13]通过控制辅助三极管的开断减小开关瞬间的栅源阻抗,但是此方法需额外的控制信号,增加了控制复杂程度。

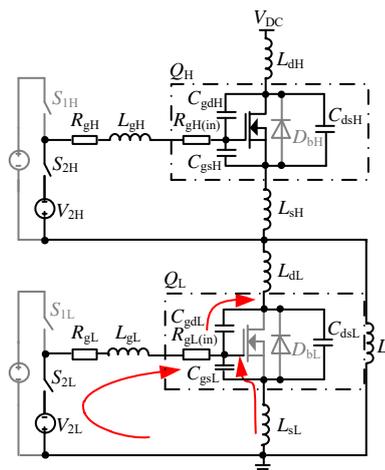
综上所述,现有典型 SiC MOSFET 串扰抑制方法大都以增大开关损耗,增加控制复杂程度等为代价。由此,本文建立 SiC MOSFET 传统驱动及典型抑制串扰驱动电路的仿真模型,并对其驱动特性进行比较分析,为 SiC MOSFET 驱动电路的改进与优化提供参考依据。

2 桥臂串扰原理及其典型抑制方法

2.1 桥臂串扰原理

SiC MOSFET 无外加辅助电路的传统门极驱动串扰产生原理如图 1 所示,图中 Q_H 、 Q_L 为上下桥臂的 SiC MOSFET 开关管。为了分析方便,上桥臂 Q_H 开关过程中, Q_L 驱动电压为负值, Q_H 开关过程中电压电流波形如图 2 所示。

由图 2 可知, Q_H 的开通过程可分为 4 个阶段,在 $t_2 \sim t_3$ 阶段, Q_H 漏源电流 i_{dsH} 达到最大值后开始减小,其栅源电压 v_{gsH} 停止上升出现米勒平台,在此过程中, Q_H 漏源电压 v_{dsH} 迅速下降, Q_L 漏源电压 v_{dsL} 迅速上升, Q_L 的米勒电容 C_{gdL} 开始充电,充电的米勒电流如图 1(a)中箭头所示,此电流在栅极阻抗中产生负压降,从而抬升了 Q_L 的栅源驱动电压 v_{gsL} ,可能导致 v_{gsL} 超过阈值电压 $V_{GS(th)}$,引起误导通; Q_H 的关断过程也可分为 4 个阶段,在 $t_6 \sim t_7$ 阶段, v_{gsH} 降至米勒电压 V_{miller} , v_{dsH} 迅速上升, v_{dsL}



(b) Q_H 关断瞬间

图 1 传统驱动电路串扰产生原理

Fig. 1 The principle of crosstalk causing in traditional drive circuit

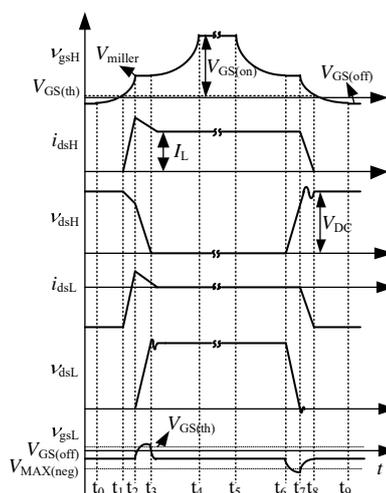


图 2 Q_H 开关过程电压电流波形

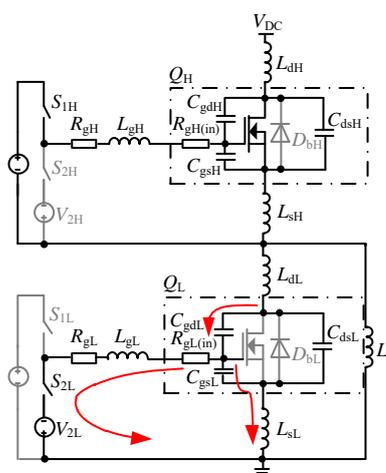
Fig.2 Voltage and current waveforms of the Q_H switching process

迅速下降, Q_L 的米勒电容 C_{gdL} 开始放电,放电的米勒电流如图 1(b)中箭头所示,此电流在栅极阻抗中产生正压降,从而降低了 Q_L 的栅源驱动电压 v_{gsL} ,可能导致 v_{gsL} 超过负压峰值,损坏器件。

从以上分析可知,受 SiC MOSFET 高开关速度及电路寄生参数的影响,在上桥臂器件 Q_H 开关过程中,会引起下桥臂 Q_L 栅源电压 v_{gsL} 振荡的桥臂串扰现象。

2.2 典型抑制串扰驱动方法及工作原理

典型抑制串扰驱动电路通常采用降低栅极驱动阻抗,负压关断及有源钳位等方法,其驱动电路结构框图如图 3 所示。



(a) Q_H 开通瞬间

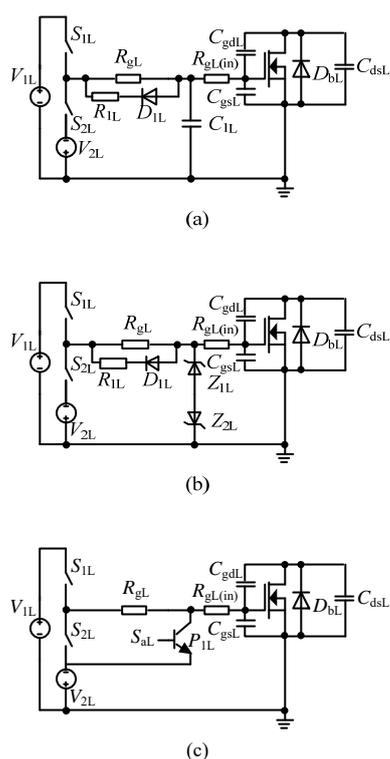
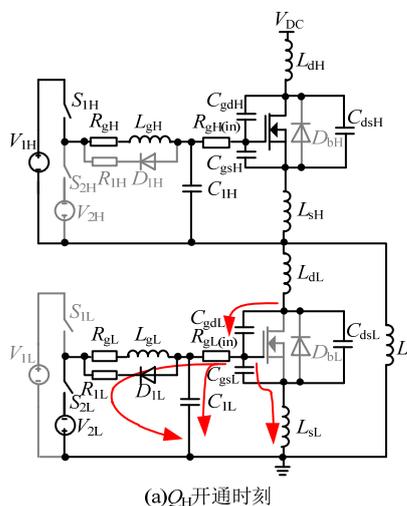


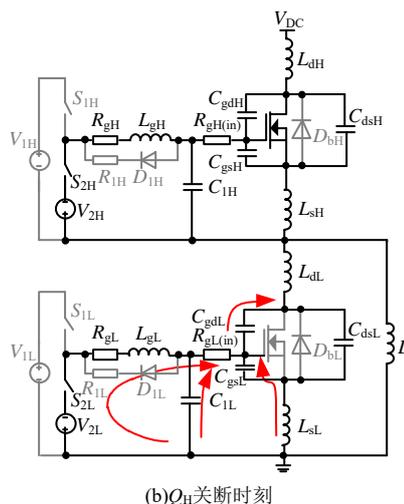
图 3 典型抑制串扰驱动电路结构框图
Fig.3 The structure diagram of typical crosstalk suppression driving circuits

如图 3(a)所示的典型抑制串扰驱动电路工作原理如图 4 所示, 在上桥臂 Q_H 开通过程中, 下桥臂 Q_L 栅极阻抗 R_{gL} 产生负压降, 二极管 D_{1L} 正向导通, Q_L 驱动电阻减小, 同时 C_{gdL} 的充电米勒电流通过并联电容 C_{1L} 分流, 减小了栅极驱动阻抗, 抑制了 Q_H 开通瞬间引起的 Q_L 栅极振荡。 Q_L 关断过程中, 栅极阻抗产生的正压降, 二极管 D_{1L} 反向截止, C_{gdL} 的放电米勒电流经过并联电容 C_{1L} 分流, 减小栅极驱动阻抗, 抑制了 Q_H 关断瞬间引起的 Q_L 栅极振荡。

如图 3(b)所示的典型抑制串扰驱动在栅源之间



(a) Q_H 开通时刻



(b) Q_H 关断时刻

图 4 典型抑制串扰驱动电路(a)工作原理

Fig.4 Working principle of typical crosstalk suppression driving circuit (a)

并联了稳压二极管钳位电路, 使上桥臂 Q_H 在开通过程中, v_{gsH} 不超过正向电压峰值 $V_{MAX(pos)}$, v_{gsL} 不超过负向电压峰值 $V_{MAX(neg)}$, 同时在栅极反并接二极管电路, 降低栅极驱动阻抗, 抑制下桥臂 v_{gsL} 低于阈值电压 $V_{GS(th)}$, 避免误导通。

如图 3(c)所示的典型抑制串扰驱动在上桥臂 Q_H 开关瞬间中, S_{aH} 输出低电平, 辅助三极管 P_{1H} 关断, 而 S_{aL} 输出高电平, 辅助三极管 P_{1L} 导通, 使 Q_L 栅源电压 v_{gsL} 钳位在关断负压, 抑制串扰。

3 典型抑制串扰驱动仿真分析

本节基于 LTspice 仿真平台搭建了 CREE 公司第 2 代 1.2kV SiC MOSFET 半导体器件 C2M0080120D 的不同典型抑制串扰驱动电路模型, 并进行对比分析。

C2M0080120D 的基本参数见表 1^[14], 仿真模型的负载电感为 400uH, NPN 三极管选择高功率密度、低饱和压降、高阻断压降的 ZXTN25100BFHTA, 肖基特二极管选择低导通压降、快反向恢复的 1N5819HW-7-F, 稳压二极管选择 5.1V 稳压管 MMSZ5231B 与 20V 稳压管 MMSZ5250B, 光耦隔离芯片选择具有较快转换速

表 1 C2M0080120D 基本参数

Tab.1 Basic parameters of C2M0080120D

栅源电压(V_{gs})	+20/-5V	阈值电压($V_{GS(th)}$)	2 V
栅源电容(C_{gs})	942.4 pF	栅漏电容(C_{gd})	7.6 pF
正压最大值	25 V	负压最大值	-10 V
($V_{MAX(pos)}$)		($V_{MAX(neg)}$)	
内部电阻($R_{g(in)}$)	4.6 Ω	开关速度(dv/dt)	40 V/ns

率的 ACPL-4800, 驱动芯片选择具有较强驱动能力的 IXDN609, 电路中无源器件的参数见表 2。

表 2 不同驱动电路无源器件基本参数

Tab.2 Basic parameters of passive devices

in different driving circuits

典型驱动电路	(a)	(b)	(c)
R_{gl}	10 Ω	10 Ω	10 Ω
R_{IL}	10 Ω	10 Ω	/
C_{IL}	10 nF	/	/

当输入电压为 400V, 负载电流为 5A 时, Q_H 开通与关断时刻不同驱动电路的电压电流波形如图 5 所示, 其对比结果如表 3 所示。

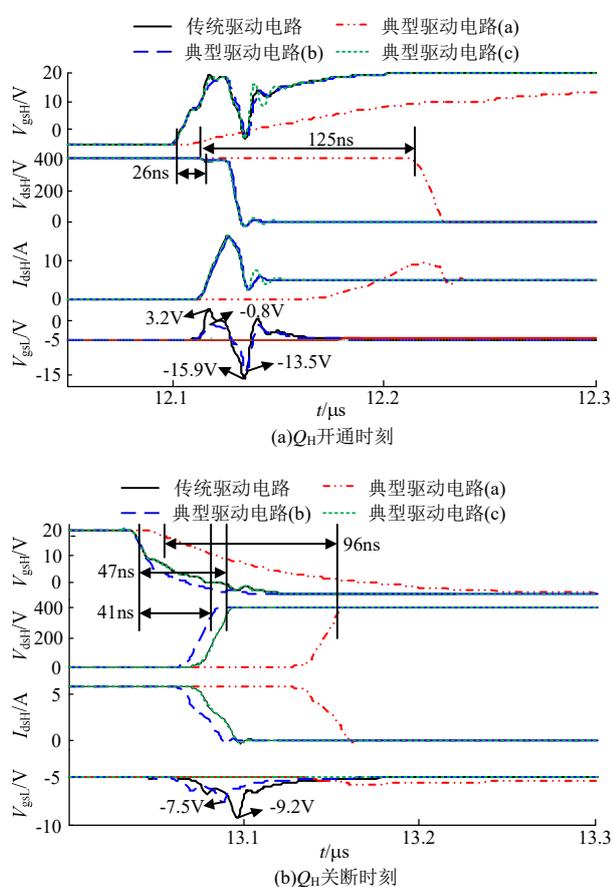


图 5 不同驱动电路的电压电流波形

Fig.5 Voltage and current waveforms of different driving circuits

从图 5 与表 3 可知, 传统驱动电路的 Q_L 正向电压峰值为 3.2V, 大于阈值电压 $V_{GS(th)}$, 其负向电压峰值为 -15.9V, 超过了 Q_L 允许承受的最大负向电压峰值 $V_{MAX(neg)}$, 串扰现象明显。

典型抑制串扰驱动电路(a)、(b)、(c)都能有效抑制下桥臂 Q_L 正向电压峰值, 但是典型驱动电路(b)的负向电压峰值达到了 -13.5V, 超过了器件所能承受的负压最值, 在 Q_H 关断瞬间, 流经驱动电路(b)

钳位稳压管 Z_{IL} 的电流波形如图 6 所示, 由图可知, Z_{IL} 电流幅值在关断瞬间高达几百毫安, 而稳压管正常工作时电流只有几十毫安, 大大超过了其规定值, 破坏了稳压管的稳压特性, 导致稳压效果变差。虽然典型驱动电路(a)能有效抑制串扰, 但相比传统驱动电路开通延时增加了 380%, 关断延时增加了 104%, 开关总损耗增加了 59%, 这是由于在栅源间并联电容相当于增大了栅源极间等效电容, 延长了栅源电容的充放电时间, 导致 Q_H 开关延时增加、开关损耗增大。典型驱动电路(c)能有效抑制桥臂串扰现象, 且不会增加开关延时与损耗, 但其通过外加控制信号实现有源钳位, 需要考虑外加控制信号的延时问题, 进而增加了控制的复杂程度与成本。

表 3 不同驱动电路对比

Tab.3 Comparison of different driving circuits

驱动电路	传统驱动	典型驱动(a)	典型驱动(b)	典型驱动(c)
开通延时时间 ($t_{d(on)}$)	26 ns	125 ns	26 ns	26 ns
关断延时时间 ($t_{d(off)}$)	47 ns	96 ns	41 ns	47 ns
开通损耗(E_{on})	66 μ J	105 μ J	64 μ J	69 μ J
关断损耗(E_{off})	12 μ J	19 μ J	9 μ J	11 μ J
正向峰值(V_p)	3.2 V	-4.5 V	-0.8 V	-4.9 V
负向峰值(V_n)	-15.9 V	-5.7 V	-13.5 V	-5.1 V

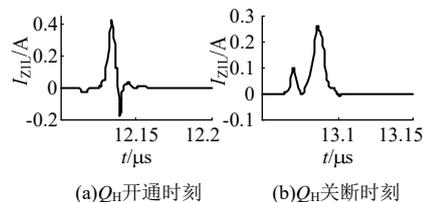


图 6 稳压管 Z_{IL} 电流波形

Fig.6 The current waveforms of the regulator tube Z_{IL}

4 总结

针对 SiC MOSFET 传统驱动电路受高开关速度及寄生参数的影响而产生桥臂串扰现象, 本文对几种典型抑制串扰驱动电路进行研究, 分析了其抑制原理, 并建立仿真模型对比分析不同驱动电路的驱动特性, 得出以下结论:

1) 传统无辅助电路的驱动方法, SiC MOSFET 会出现桥臂串扰现象。

2) 在栅源之间并联辅助电容的抑制方法相当于增大了栅源等效电容, 延长了栅源电容的充放电时间, 导致 SiC MOSFET 开关延时增长, 开关损耗增大。

3) 在栅源间并联稳压二极管钳位电路抑制串扰时, 由于没有限流电阻的作用, 在 SiC MOSFET 开关瞬间, 流经稳压管的电流大大超过其正常工作限定值, 影响稳压效果。

4) 通过外加控制信号实现有源钳位的方法能较好的抑制串扰现象, 且不会增加开关延时与损耗, 但存在外加信号延时等问题, 增加了控制成本与复杂程度。

参考文献

- [1] 王学梅. 宽禁带碳化硅功率器件在电动汽车中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 371-379.
- [2] 盛况, 郭清, 张军明, 等. 碳化硅电力电子器件在电力系统的应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 1-7.
- [3] Spagnuolo G, Petrone G, Araujo S V, et al. Renewable Energy Operation and Conversion Schemes: A Summary of Discussions During the Seminar on Renewable Energy Systems[J]. Industrial Electronics Magazine IEEE, 2010, 4(1): 38-51.
- [4] Biela J, Schweizer M, Waffler S, et al. SiC versus Si—Evaluation of Potentials for Performance Improvement of Inverter and DC-DC Converter Systems by SiC Power Semiconductors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(7): 2872-2882.
- [5] Xu F, Han T J, Jiang D, et al. Development of a SiC JFET-Based Six-Pack Power Module for a Fully Integrated Inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(3): 1464-1478.
- [6] Jahdi S, Alatisse O, Alexakis P, et al. The Impact of Temperature and Switching Rate on the Dynamic Characteristics of Silicon Carbide Schottky Barrier Diodes and MOSFETs[J]. Industrial Electronics IEEE Transactions on, 2015, 62(1): 163-171.
- [7] Wang J, Chung H S H. Impact of parasitic elements on the spurious triggering pulse in synchronous buck converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6672-6685.
- [8] Yin S, Tseng K J, Tong C F, et al. A 99% efficiency SiC three-phase inverter using synchronous rectification[C]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE, 2016: 2942-2949.
- [9] Paredes A, Sala V, Ghorbani H, et al. A novel active gate driver for silicon carbide MOSFET[C]. Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE. IEEE, 2016: 3172-3177.
- [10] Zushi Y, Sato S, Matsui K, et al. A novel gate assist circuit for quick and stable driving of SiC-JFETs in a 3-phase inverter[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE, 2012: 1734-1739.
- [11] 张旭, 陈敏, 徐德鸿. SiC MOSFET 驱动电路及实验分析[J]. 电源学报, 2013(3): 71-76.
- [12] Zhang Z, Wang F, Tolbert L M, et al. Active Gate Driver for Crosstalk Suppression of SiC Devices in a Phase-Leg Configuration[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(4): 1986-1997.
- [13] Mo F, Furuta J, Kobayashi K. A low surge voltage and fast speed gate driver for SiC MOSFET with switched capacitor circuit[C]. Wide Bandgap Power Devices and Applications. IEEE, 2016: 282-285.
- [14] C2M0080120D-Silicon Carbide Power MOSFET. <http://www.wolfspeed.com/index.php/downloads/dl/file/id/167/product/0/c2m0080120d.pdf>.

作者简介:

李辉(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事风力发电技术, SiC 电力电子器件应用与可靠性研究, cqulh@163.com;

黄樟坚(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事电机控制、SiC 驱动设计等研究。