

改善 SiC MOSFET 开关特性的有源驱动电路研究

卢乙, 李先允, 王书征, 何鸿天, 周子涵

(南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 针对碳化硅金属氧化物半导体场效应管(SiC MOSFET)开关过程中存在的电流、电压过冲和振荡问题, 首先对 SiC MOSFET 的开关过程进行详细分析, 得出电流、电压过冲和振荡的产生机理, 然后根据影响过冲和振荡的关键因素, 分别提出了电流注入型、变电压型和变电阻型有源驱动电路, 并通过 LTspice 仿真软件验证了所提有源驱动电路的有效性, 最后搭建实验平台对所提变电压型有源驱动电路进行实验验证。实验结果表明, 所提变电压型有源驱动电路能够在牺牲较小开关损耗的条件下, 有效抑制 SiC MOSFET 开关过程中的电流、电压过冲和振荡。

关键词: 碳化硅金属氧化物半导体场效应管(SiC MOSFET); 有源驱动电路; LTspice 仿真软件; 过冲; 振荡

中图分类号: TM13 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd21692

Research on Active Gate Driver for Improving SiC MOSFET Switching Characteristics

LU Yi, LI Xianyun, WANG Shuzheng, HE Hongtian, ZHOU Zihan

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

Abstract: Aiming on the problems of current and voltage overshoot and oscillation during the silicon carbide metal oxide semiconductor field effect transistor (SiC MOSFET) switching process, the generation mechanism of current and voltage overshoot and oscillation was obtained firstly based on the analysis of the SiC MOSFET switching process. Then, the current-injected, variable-voltage and variable-resistance active gate drivers were proposed according to the key factors affecting the overshoot and oscillation, and the effectiveness of the proposed active gate drivers was verified by LTspice simulation software. Finally, an experimental platform was set up for experimental verification of the proposed variable-voltage active gate driver. The experimental results show that the proposed variable-voltage active gate driver can effectively suppress the current and voltage overshoot and oscillation during the SiC MOSFET switching process at the expense of small switching losses.

Key words: silicon carbide metal oxide semiconductor field effect transistor (SiC MOSFET); active gate driver; LTspice simulation software; overshoot; oscillation

经过几十年的发展, 硅(silicon, Si)功率器件已经达到其理论极限, 无法满足日益增长的电力电子应用需要, 与 Si 功率器件相比, 碳化硅(silicon carbide, SiC)功率器件具有更高的击穿电场强度、更高的工作温度和更高的工作频率。因此, 以 SiC MOSFET 为代表的 SiC 功率器件正替代 Si MOSFET, 被广泛应用于电机驱动器, 光伏逆变器和变压器等设备中^[1-3]。

但是 SiC MOSFET 的过快开关速度会引起高

di/dt 和 dU/dt , 同时由于电路中寄生电感和寄生电阻等参数的存在, 使得 SiC MOSFET 在开关过程中容易发生电流、电压过冲和振荡, 这会产生额外的开关损耗, 甚至造成器件损坏。可以通过增加驱动电阻阻值和增加吸收电路来解决上述问题, 但是驱动电阻阻值的增加会减缓器件的开关速度, 增加开关时间和开关损耗, 另外, 吸收电路中额外增加的电阻、电容等器件会产生额外的损耗。因此, 越来越多的研究人员将研究方向转为

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2018130); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目

(SJXC19_0530); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(SJXC19_0532)

作者简介: 卢乙(1994—), 男, 硕士, Email: 8807117@qq.com

通讯作者: 李先允(1960—), 男, 博士, 教授, Email: alixy6412@aliyun.com

驱动侧,希望通过使用有源驱动技术,在牺牲较小开关损耗的条件下,抑制SiC MOSFET开关过程中的电流、电压过冲和振荡^[4-6]。

本文首先对SiC MOSFET的开关过程进行详细分析,得出电流、电压过冲和振荡的产生机理,并针对影响过冲和振荡的关键因素,分别提出了电流注入型、变电压型和变电阻型有源驱动电路(active gate driver, AGD),然后通过仿真验证了各有源驱动电路的有效性,最后搭建了实验平台,对所提出的变电压型有源驱动电路进行了实验验证。

1 SiC MOSFET 开关过程

采用图1所示的测试电路对SiC MOSFET的开关过程进行分析,图1中, U_{dc} 为直流母线电压, C 为滤波电容, D 为续流二极管, L 为负载电感, L_d, L_s 分别为SiC MOSFET的漏、源极寄生电感, C_{gd}, C_{gs} 和 C_{ds} 分别为SiC MOSFET的栅漏极、栅源极和漏源极寄生电容, R_g 为驱动电阻, R_{stray} 为线路中的杂散电阻,并定义SiC MOSFET的输入电容 $C_{iss}=C_{gs}+C_{gd}$,输出电容 $C_{oss}=C_{gd}+C_{ds}$ ^[7-10]。

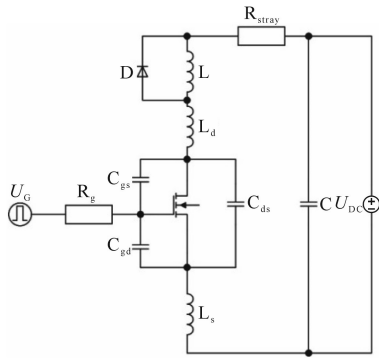


图1 测试电路

Fig.1 Test circuit

图2为SiC MOSFET开通过程中驱动电压 U_G 、栅源极电压 U_{gs} 、漏极电流 i_d 和漏源极电压 U_{ds} 的典型波形。

从图2可以看出, SiC MOSFET的开通过程可以分为4个阶段。

阶段一 $[t_0-t_1]$: t_0 时刻, 驱动电压 U_G 从 U_{ce} 阶跃至 U_{cc} , U_{gs} 开始缓慢上升, 该阶段内器件始终处于关断状态。

阶段二 $[t_1-t_2]$: t_1 时刻, U_{gs} 上升至阈值电压 U_{th} , 器件开始导通, 负载电流流经SiC MOSFET, 漏极电流 i_d 开始上升, 可由下式表示:

$$i_d = g_{fs}(U_{gs} - U_{th}) \quad (1)$$

式中: g_{fs} 为SiC MOSFET的跨导。

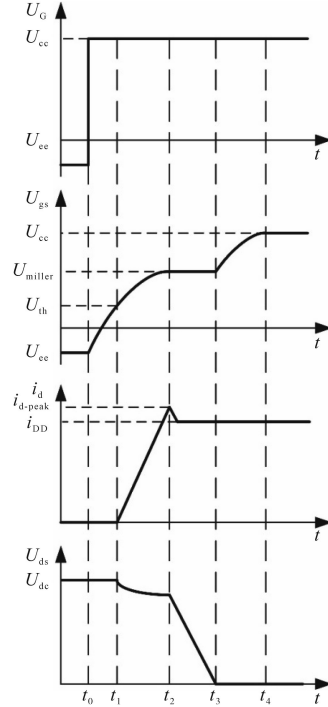


图2 SiC MOSFET开通过程波形

Fig.2 Waveforms of SiC MOSFET turn-on process

当 i_d 上升至负载电流 i_{DD} 时, 由于续流二极管中储存电荷的存在, 其会进入反向恢复过程并产生反向恢复电流, 该电流最大值 i_{rr-max} 表达式如下式所示:

$$i_{rr-max} = \sqrt{\frac{2Q_{rr} di_d/dt i_d = i_{DD}}{S+1}} \quad (2)$$

式中: Q_{rr} 为反向恢复电荷; S 为软度因子。

di_d/dt 可由下式表示:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{g_{fs}(U_G - U_{th})}{C_{iss}R_g + g_{fs}L_s} = g_{fs} \frac{i_g}{C_{iss}} \quad (3)$$

由于反向恢复电流的存在, i_d 会继续增加至 i_{d-peak} , 如下式所示:

$$i_d = i_{DD} + i_{d-peak} \quad (4)$$

该阶段内 i_d 的变化会在回路寄生电感上产生压降, 引起器件漏源极电压 U_{ds} 的下降, 如下式所示:

$$U_{ds} = U_{dc} - (L_d + L_s) \frac{di_d}{dt} - R_{stray} i_d \quad (5)$$

阶段三 $[t_2-t_3]$: 器件进入米勒平台, U_{gs} 保持为米勒电压 U_{miller} 不变, U_{ds} 迅速下降至0, i_d 从 i_{d-peak} 下降至 i_{DD} 并保持不变。

阶段四 $[t_3-t_4]$: U_{gs} 从 U_{miller} 上升至 U_{cc} , i_d 和 U_{ds} 均保持不变, 器件完全导通。

图3为SiC MOSFET关断过程中驱动电压 U_G 、栅源极电压 U_{gs} 、漏极电流 i_d 和漏源极电压 U_{ds} 的典型波形。

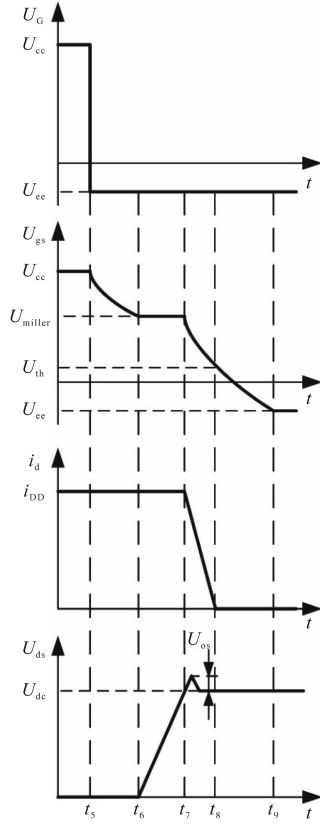


图3 SiC MOSFET关断过程波形

Fig.3 Waveforms of SiC MOSFET turn-off process

从图3可以看出, SiC MOSFET的关断过程可以分为4个阶段。

阶段五 $[t_5-t_6]$: t_5 时刻, U_G 从 U_{cc} 阶跃至 U_{th} , U_{gs} 逐渐下降, 器件始终处于导通状态。

阶段六 $[t_6-t_7]$: 器件处于米勒平台, U_{gs} 保持为 U_{miller} 不变, U_{ds} 开始上升并于 t_7 时刻升至 U_{dc} 。

阶段七 $[t_7-t_8]$: 续流二极管于 t_7 时刻开始阻断电压, 负载电流开始流经续流二极管, i_d 逐渐下降至0。电流的变化会在寄生电感上产生压降, 并在 SiC MOSFET 上产生额外应力, 使 U_{ds} 产生电压过冲, 由式(5)可知, 该电压过冲 U_{os} 可以表示为

$$U_{os} = -(L_d + L_s) \frac{di_d}{dt} - R_{stray} i_d \quad (6)$$

阶段八 $[t_8-t_9]$: U_{gs} 由 U_{th} 下降至0, 由于电路中杂散电阻的存在, U_{ds} 会发生振荡, 可由下式表示:

$$U_{ds} = U_{dc} + U_{os} e^{-\alpha(t-t_8)} \cos[\omega(t-t_8)] \quad (7)$$

其中

$$\alpha = \frac{R_{stray}}{2(L_d + L_s)}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{C_{oss}(L_d + L_s)} - \alpha^2}$$

2 有源驱动电路

由第1节的分析可知, 在 SiC MOSFET 的开通过程阶段二中, 由于续流二极管中恢复电流的存在, 漏极电流 i_d 会发生过冲, 由式(2)可知, 该电流过冲与 di_d/dt 有关, 通过减小 di_d/dt 可以抑制电流过冲, 又由式(3)可知, 通过减小栅极电流 i_g 、驱动电压 U_G 或增加驱动电阻 R_g 可以减小 di_d/dt , 从而抑制电流过冲。在 SiC MOSFET 的关断过程阶段七中, i_d 的快速变化会在 SiC MOSFET 上产生额外应力, 同时又由于杂散电阻的存在, U_{ds} 会发生过冲和振荡, 由式(6)和式(7)可知, 通过减小 di_d/dt 可以抑制电压过冲和振荡, 和开通过程相同, 通过减小 i_g , U_G 或增加 R_g 可以减小 di_d/dt , 从而抑制电压过冲和振荡。

基于上述分析, 本文分别设计了电流注入型、变电压型和变电阻型有源驱动电路, 如图4~图7所示, 能够分别在 SiC MOSFET 的开关过程中改变器件的栅极电流 i_g 、驱动电压 U_G 和驱动电阻 R_g , 从而抑制器件开关过程中的电流、电压过冲和振荡, 下面分别进行描述。

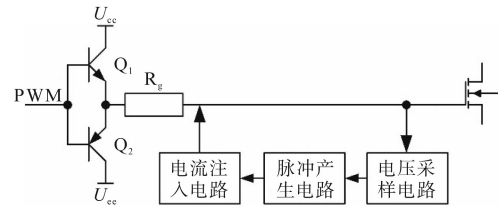


图4 电流注入型有源驱动电路框图

Fig.4 Schematic of current-injected AGD

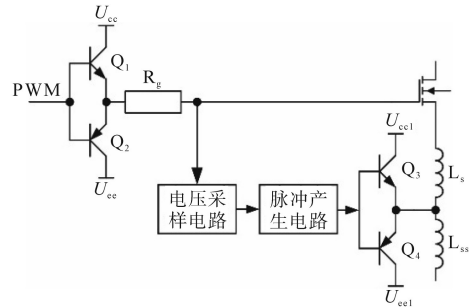


图5 变电压型有源驱动电路框图

Fig.5 Schematic of variable-voltage AGD

2.1 电流注入型有源驱动电路

图4所示为所提电流注入型有源驱动电路框图, 通过电压采样电路检测器件的栅源极电压 U_{gs} , 使脉冲产生电路能够在器件开关的不同阶段

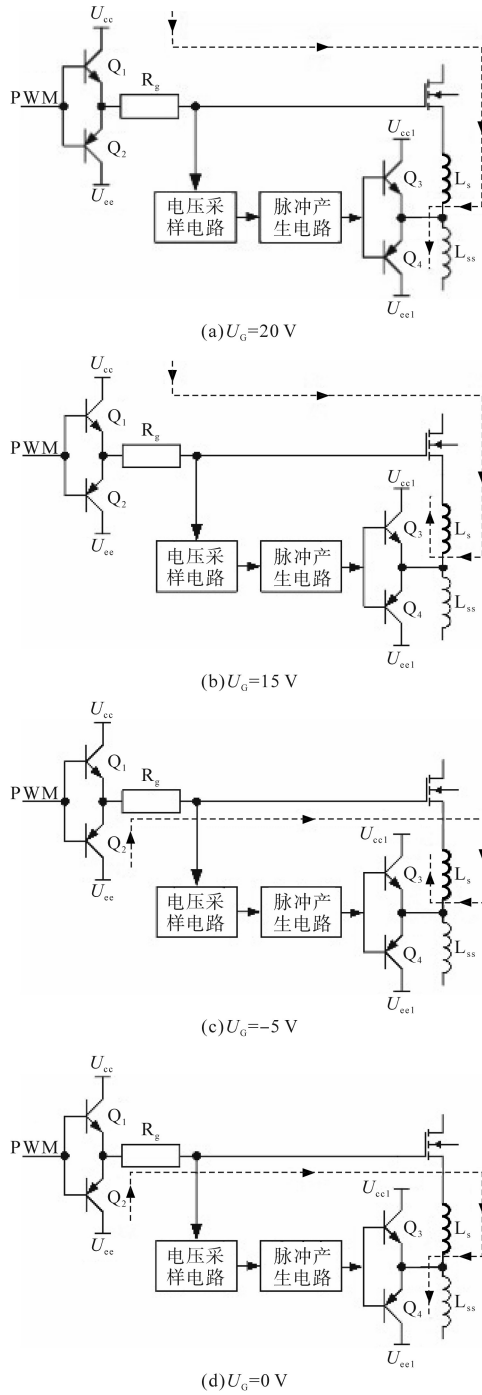


图6 变电压型有源驱动电路的不同工作状态
Fig.6 Different working states of variable-voltage AGD

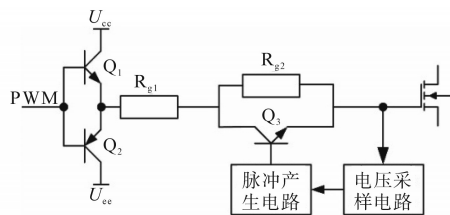


图7 变电阻型有源驱动电路框图
Fig.7 Schematic of variable-resistance AGD

内产生不同的控制信号,控制电流注入电路能够在器件开关的阶段二和阶段七内向器件栅极注入电路,从而减小器件栅极电流 i_g ,抑制开关过程的电流、电压过冲和振荡。

2.2 变电压型有源驱动电路

图5所示为所提变电压型有源驱动电路框图,其中, $U_{cc}=20\text{ V}$, $U_{cc1}=5\text{ V}$, $U_{ee}=U_{ee1}=0\text{ V}$,通过电压采样电路,使脉冲产生电路在不同的开关阶段中产生不同的触发信号,控制开关管 Q_3 和 Q_4 的通断,以改变器件的开关过程的驱动电压。图6所示为该有源驱动电路的不同工作状态,在器件开通过程非阶段二内,开关管 Q_4 导通, Q_3 关断,驱动电压为 20 V ,阶段二内,开关管 Q_4 关断, Q_3 导通,此时,驱动电压由 20 V 降至 15 V ,抑制器件开通过程的电流过冲。在器件关断过程非阶段七内,开关管 Q_3 导通, Q_4 关断,驱动电压为 -5 V ,阶段七内, Q_3 关断, Q_4 导通,此时驱动电压上升至 0 V ,抑制器件关断过程中的电压过冲和振荡。

2.3 变电阻型有源驱动电路

图7为所提变电阻型有源驱动电路框图,通过电压检测电路,使脉冲产生电路在开关过程的不同阶段产生不同的控制信号,调节器件的栅极驱动电阻。图8为该有源驱动电路的不同工作状态,在器件开关过程的阶段二和阶段七内,开关管 Q_3 由导通状态转为关断状态,此时驱动电阻由 R_{g1} 单独驱动变为 R_{g1} 和 R_{g2} 串联驱动,驱动电阻阻值增加,从而抑制器件开关过程的电流、电压过冲和振荡。

2.4 仿真验证

采用LTspice仿真软件分别对提出的三种有源驱动电路进行仿真验证,仿真结果如图9和图10所示,从图9和图10可以看出,与传统驱动电路相比,所提的电流注入型、变电压型和变电阻型有源驱动电路均可以有效抑制器件开关过程中的电流、电压过冲和振荡。其中,与传统驱动电路相比,电流注入型有源驱动电路降低了 16.2% 的电流过冲和 10.6% 的电压过冲,变电压有源驱动电路降低了 10.7% 的电流过冲和 9.6% 的电压过冲,变电阻有源驱动电路降低了 25.9% 的电流过冲和 15.9% 的电压过冲。可以看出,变电阻有源驱动电路对电流、电压过冲和振荡的抑制效果最明显,但是其对器件开关速度的影响也最大。

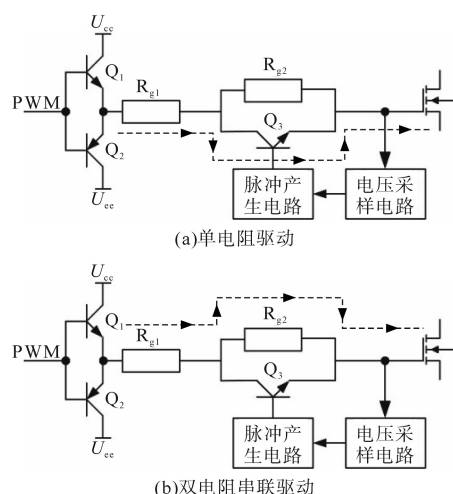


图8 变电阻型有源驱动电路的不同工作状态

Fig.8 Different working states of variable-resistance AGD

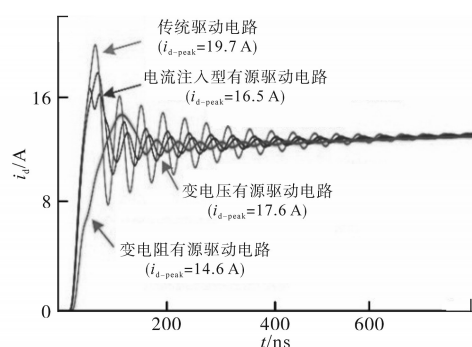

 图9 不同驱动电路开通过程 i_d 波形

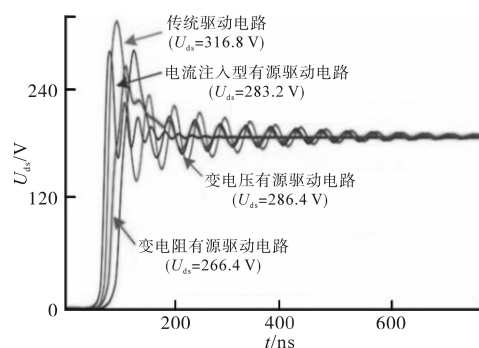
 Fig.9 i_d waveforms of different drive circuits

 图10 不同驱动电路关断过程 U_{ds} 波形

 Fig.10 U_{ds} waveforms of different drive circuits

3 实验验证

根据图5所示的变电压型有源驱动电路,搭建实验平台进行实验验证,并与传统驱动电路进行对比,实验结果如图11和图12所示。

从图11和图12可得,与传统驱动电路相比,所提出的变电压型有源驱动电路可以有效抑制器件开关过程中的电流、电压过冲和振荡,其中,

开通电流过冲由17.1 A降低至15.7 A,降低了约8.2%,振荡时间由270 ns降低至60 ns,关断电压过冲由530 V下降至490 V,降低了约7.5%,振荡时间由210 ns降至80 ns,与仿真结果相近,证明了所设计变电压有源驱动电路的实用性。

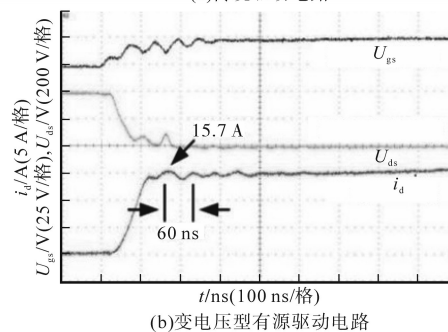
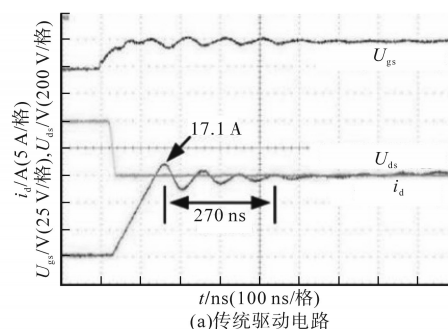


图11 不同驱动电路开通过程波形

Fig.11 Turn-on waveforms of different drive circuits

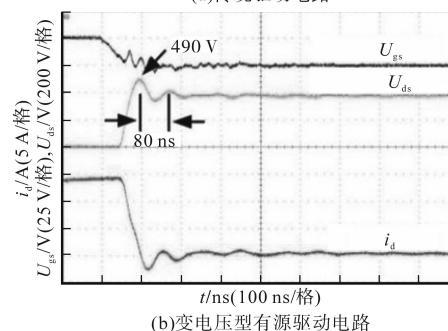
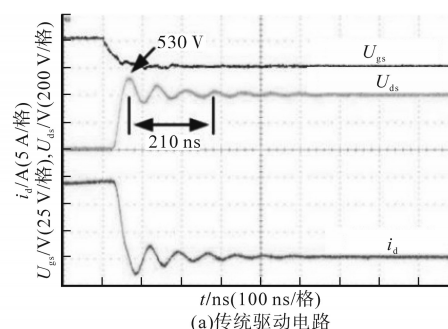


图12 不同驱动电路关断过程波形

Fig.12 Turn-off waveforms of different drive circuits

图13为两种实验条件下器件的开关损耗,从图13可得,与传统驱动电路相比,所提出的变电压型有源驱动电路增加了16.6%的开关损耗。

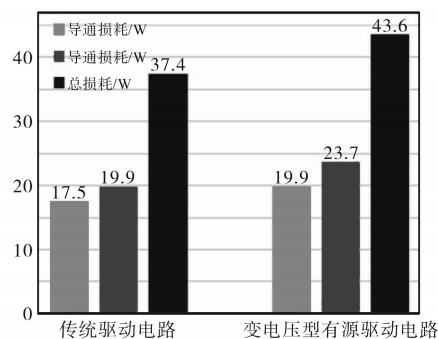


图13 不同驱动电路开关损耗

Fig.13 Switching losses of different drive circuits

4 结论

本文首先对SiC MOSFET的开关过程进行详细分析,得出器件开关过程中电流、电压过冲和振荡的产生机理,并针对影响过冲和振荡的关键参数,分别提出了电流注入型、变电压型和变电阻型有源驱动电路,然后通过LTspice仿真软件验证了各有源驱动电路的有效性,最后对所提变电压型有源驱动电路进行实验验证。实验结果表明,与传统驱动电路相比,所提变电压型有源驱动电路能够在牺牲少量开关损耗的前提下,有效抑制器件开关过程中的电流、电压过冲和振荡。

参考文献

[1] 盛况,任娜,徐弘毅. 碳化硅功率器件技术综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1741-1753.

[2] 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.

[3] He Ning, Chen Min, Wu Junxiong, *et al.* 20 kW zero-voltage-switching SiC-mosfet grid inverter with 300 kHz switching frequency[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5175-5190.

[4] 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.

[5] Yuan Yang, Yang Wen, Yong Gao. A novel active gate driver for improving switching performance of power SiC MOSFET modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 7775-7787.

[6] Wang Tao, Lin Hua, Liu Shengsheng. An active voltage balancing control based on adjusting driving signal time delay for series-connected SiC MOSFETs[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(1): 454-464.

[7] 梁美,郑琼林,李艳,等. 用于精确预测SiC MOSFET开关特性的分析模型[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 148-158.

[8] Xuan Li, Ben Tan, Alex Q Huang, *et al.* Impact of termination region on switching loss for SiC MOSFET[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(2): 1026-1031.

[9] 冯超,李虹,蒋艳峰,等. 抑制瞬态电压电流尖峰和振荡的电流注入型SiC MOSFET有源驱动方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5666-5673, 5894.

[10] Alejandro Paredes Camacho, Vicent Sala, Hamidreza Ghorbani, *et al.* A novel active gate driver for improving SiC MOSFET switching trajectory[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 9032-9042.

收稿日期:2020-03-30

修改稿日期:2020-04-10