

基于 Si IGBT/SiC MOSFET 的混合开关器件综述

宁圃奇^{1,2,3,4}, 李磊^{1,2,3,4}, 曹瀚^{1,2,3,4}, 温旭辉^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 北京电动车辆协同创新中心, 北京 100081)

摘要: 综述了基于 Si IGBT/SiC MOSFET 的混合开关器件, 总结了相关的门极驱动时序、门极驱动硬件设计、电流分配优化、功率模块设计、变频器设计和成本分析等要素。该类混合开关器件可以实现 Si IGBT 的零电压开通和零电压关断, 大幅缩短 Si IGBT 的拖尾电流时间, 降低开关损耗, 并可实现高频运行。该类混合开关器件还利用了 Si IGBT 的导通特性优势, 与同规格纯 SiC 器件相比成本大幅降低。部分文献的仿真与实验结果验证了该类器件的优异特性, 所开发的示范性样机具有较高使用价值, 一定程度上可满足同时需求高频开关和中、大功率的应用。

关键词: 碳化硅芯片; 混合开关; 门极驱动; 功率模块; 变频器

DOI: 10.12067/ATEEE1807044

文章编号: 1003-3076(2018)10-0001-09

中图分类号: TM341

1 引言

近年来, 由于碳化硅(SiC)器件具有优异的性能, 如单位导通电阻小、可高频开关、可高温运行、耐压高、抗辐射等优点, 成为电力电子界重点研究的方向之一, 具有广阔的应用前景^[1,2]。

世界各国都在努力开发 SiC 器件, 并希望能够尽快应用到各行业的变频器中, 早日替代现有硅器件。美国能源部在研究报告中明确指出, 利用 SiC 器件是实现 2020 年车用电机驱动价格减半的关键要素, 在其部署的新能源车项目中 60% 与 SiC 器件应用相关^[2]。日本以三菱、富士、瑞萨为首的各大功率芯片厂商均已开发出各自的 SiC 芯片, 并应用于高效变频器^[3]。全球 SiC 器件的市场规模于 2017 年已达到 3.2 亿 \$, 其中 2016 ~ 2017 年 SiC MOSFET 供应商的数量增加一倍^[4], 2017 年我国国内市场应用 SiC、GaN 功率器件的规模也达到了 18.3 亿元^[5,6]。

然而, 受到 SiC 晶圆生长工艺和芯片加工能力限制, 当前 SiC MOSFET 的单芯片载流能力远低于 Si IGBT^[3]。对于 50kW 左右的中低压变频器, 最常使用的 1200V/600A 桥臂模块仅需要 6 个 Si IGBT 芯

片, 如果采用 SiC MOSFET 封装模块则需要使用 24 个开关芯片。具有大数量芯片(数量大于 20)的模块封装设计十分复杂, 电气杂散参数难以一致, 瞬态下各芯片间极易产生强烈不均流的现象, 局部过热点会迅速损坏芯片, 导致变频器可靠性大幅下降^[6,7]。对于需要更高电压的电网应用, Si IGBT 已有 6500V/1200A 模块产品, 而 10kV SiC MOSFET 芯片的载流能力仅为 10A, 很难在短期内进行规模化应用^[8]。

制约芯片载流能力的另一因素是成本, 提高芯片面积是提高载流能力主要方法。现阶段 SiC 衬底普遍存在缺陷, 强行增大芯片面积会导致成品率大幅下降、价格飙升^[5]。在现阶段, 同等电气规格的 SiC MOSFET 器件价格是 Si IGBT 器件的 7 ~ 15 倍^[9]。根据国际著名公司 Yole 的数据, SiC 有减少缺陷、降低价格的大趋势, 今后 10 年 SiC MOSFET 将迎来黄金时代, 但其载流能力和价格依然难以达到 Si IGBT 的水平, 大电流应用仍有一定阻碍^[4]。

面对大电流应用的需求, 为解决这一问题, SiC/Si 混合器件开始出现。最初是简单的 SiC Diode/Si IGBT 混合方法, 并不能充分发挥 SiC 的优势, 还可能带来剧烈的开关振荡^[10]。近年来, 各国研究人员

收稿日期: 2018-07-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB01006024)

作者简介: 宁圃奇(1982-), 男, 天津籍, 研究员, 博士, 研究方向为电力电子器件与变频器;
李磊(1992-), 男, 山西籍, 博士研究生, 研究方向为电力电子器件与变频器。

不断开展 SiC MOSFET/Si IGBT 混合开关器件 (Hybrid Switch, HyS) 的研究^[8-29], 能够实现 IGBT 的零电压开通和关断, 有效结合 SiC MOSFET 的低开关损耗优点和 Si IGBT 大载流能力优点, 各器件损耗比较如图 1 所示, 与纯 SiC 器件相比成本也会大幅下降, 特别适合用于同时需求大电流、高开关频率、高功率密度的车用电机控制器、大功率无线充电、多电化飞机和电力电子变压器等应用^[7]。

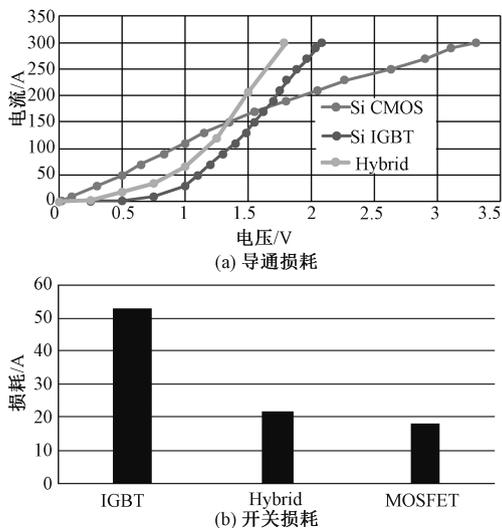


图 1 损耗比较^[19]

Fig. 1 Losses comparison^[19]

本文综述了基于 Si IGBT/SiC MOSFET 的混合开关器件, 分析了相关的门极驱动时序、门极驱动硬件设计、电流分配优化、功率模块设计、变频器设计和成本分析等设计要点。

2 门极驱动时序

在常规的混合开关器件驱动时序中, 为了降低开关损耗, 实现 Si IGBT 的零电压 (ZVS) 开通和零电压关断, 需要在 Si IGBT 开通前开通 SiC MOSFET, 在 Si IGBT 关断后关断 SiC MOSFET。

常见的 4 种门极驱动时序如图 2 所示, 时序 1 是理想器件的驱动时序, Si IGBT 和 SiC MOSFET 的开关时序与门极驱动时序相同。一般情况下 SiC MOSFET 的门极电容远小于 Si IGBT, 开关延时也很小, 门极驱动采用时序 2 可以达到与时序 1 类似的开关效果, 但可以简化电路。如果 HyS 由独立器件组成, 回路中将存在较大的寄生阻抗, Si IGBT 的开关过程将有较大的延迟, 门极驱动可采用时序 3 实现 ZVS, 能够减小 SiC MOSFET 独立开通载流的时

间。一些门极硬件设计不能很好地抑制 Si IGBT 的米勒 (Miller) 效应, 需要采用时序 4 驱动防止 Si IGBT 误导通, 这种方法会带来较大的损耗, 有违 HyS 的设计初衷。

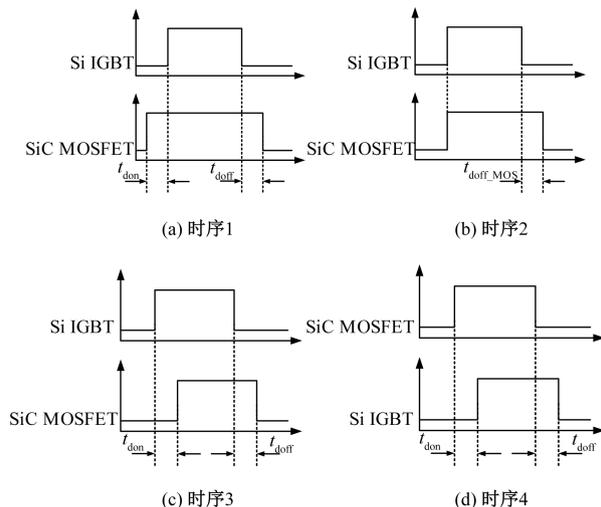


图 2 HyS 门极驱动时序^[12]

Fig. 2 Gate drive patterns for HyS^[12]

参考文献^[27]给出了另一种驱动时序, 通过降低 SiC/Si 配比来降低成本, 如图 3 所示。在这种时序中, SiC MOSFET 先于 Si IGBT 开通, 在 Si IGBT 开通后立刻关断, 并于 Si IGBT 关断前再次开通, 在 Si IGBT 关断后再次关断。

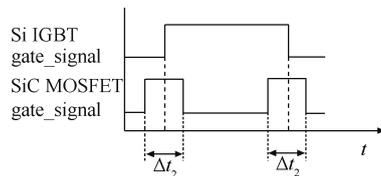


图 3 一种 MOSFET 开关两次的 HyS 门极驱动时序^[27]

Fig. 3 Gate drive pattern with SiC MOSFET switched twice^[27]

图 3 中 SiC MOSFET 只在 HyS 开关瞬态时间内处于导通状态, 降低了 SiC MOSFET 的导通损耗。然而, 这些损耗完全转移到 Si IGBT 上, 多出的两次开关动作及由此导致的换流过程会引起总损耗的增加, 与时序 1 相比其效果较差, 还会引起稳定性问题。

3 门极驱动硬件设计

在文献^[8-17]所示的 HyS 关断过程中, 可以明显地观察到米勒效应。这是由 SiC MOSFET 的高速关断引起的, 较大的 dv/dt 将在已关断的 Si IGBT 门极回路上引起较大干扰, 感生的米勒电流通过 Si

IGBT 门极阻抗出现电压尖峰,当尖峰超过门极电压阈值时 Si IGBT 会再次导通。

米勒效应将影响 Si IGBT 的 ZVS 过程,虽然 HyS 的拖尾电流时间短于纯 Si IGBT 器件,关断时间和关断损耗却远大于纯 SiC MOSFET 器件。特别对于由独立器件组成的 HyS,较大的寄生阻抗将使这一现象更为恶劣,有些研究者使用图 2 中的时序 4,但会带来较大损耗。

文献[11]采用负电压来抑制米勒现象,但在 HyS 中 Si IGBT 的发射极和 SiC MOSFET 的源极连在一起。-5 V 是常规 SiC MOSFET 产品使用的合理负值,但仍不能够完全抑制米勒现象。

文献[19]采用带有米勒钳位功能的门极驱动芯片 ACPL-332J 来改进硬件电路,实现了较好的效果,带有米勒钳位的门极驱动电路如图 4 所示。该芯片内部具有米勒钳位功能,能够在 Si IGBT 关断的情况下降低门极回路阻抗,降低感生电压峰值,从而抑制米勒现象。

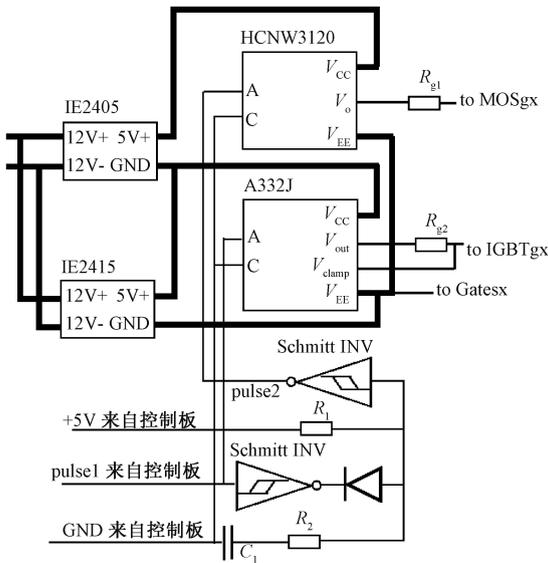
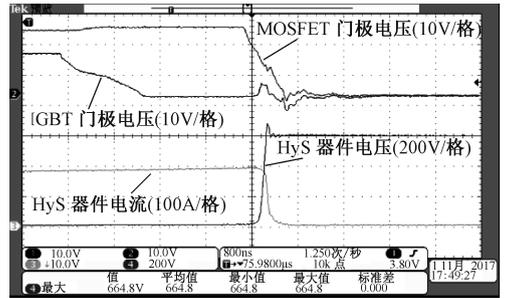


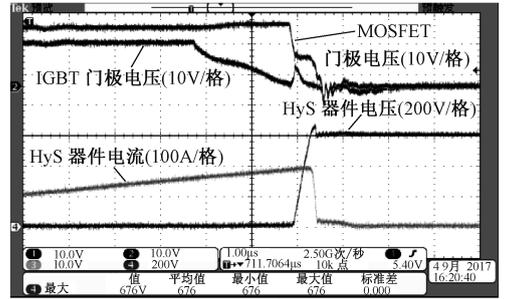
图 4 带有米勒钳位的门极驱动电路^[14]
Fig. 4 Gate drive circuit with Miller clamp^[14]

为降低驱动复杂度,该电路对于 SiC MOSFET 使用简单的 HCNW3120 进行驱动。文献[19]将该电路用于一款 1200V/200A HyS 模块的驱动,在 600V/200A 下的双脉冲实验关断波形如图 5 所示。

图 5 中使用了带有米勒钳位的驱动芯片后,HyS 实现了快速关断,没有明显的拖尾电流,更接近纯 SiC 器件。与不使用米勒钳位芯片的驱动电路相比,其瞬态特性见表 1^[19]。



(a) 使用米勒钳位芯片的 HyS 关断过程



(b) 不使用米勒钳位芯片的 HyS 关断过程

图 5 HyS 关断瞬态过程对比^[19]

Fig. 5 HyS turn off transient^[19]

表 1 双脉冲测试效果对比^[14]

Tab. 1 Double pulse test results comparison^[14]

参数名称	数值		
	不使用米勒钳位驱动芯片	使用米勒钳位驱动芯片	只驱动 HyS 中的 Si IGBT
母线电压/V	600	600	600
电感电流/A	200	200	200
门极电压/V	MOS 20 IGBT 15	MOS 20 IGBT 15	MOS 0 IGBT 15
门极电阻/ Ω	MOS 5 IGBT 15	MOS 47 IGBT 15	IGBT 15
t_{off}/ns	537.6	460	1861
E_{off}/mJ	34.11	11.03	40.26
V_{CEpk}/V	676	664.81	676
t_{on}/ns	134.4	160	307
E_{on}/mJ	8.16	10.99	12.14

文献[11]讨论了门极驱动与器件短路耐量的关系。如果降低 MOSFET 的驱动电压,HyS 的整体短路耐量将有所改进,但损耗会大幅增加。

4 电流分配优化和 HyS 模块设计

HyS 器件内部电流分配优化过程中经常使用 SiC/Si 配比参数,低配比能降低 SiC MOSFET 芯片的载流压力和散热压力,也能降低 HyS 的整体成本。

文献[18]基于已商业化的 Si IGBT 和 SiC MOSFET 独立器件对 1.2kV 的 HyS 进行了较为系统的配比优化,得到了 1:4 和 1:6 的低配比方案。在优化过程中主要比较了器件的结温,采用仿真和等效网络等方法估算相关结温。但 50A 的 SiC MOSFET 芯片只能在短时间内支撑 300A 运行,难以超过 500ns,相关优化应该注意与门极驱动的时序结合。

文献[14]给出了 HyS 模块电流分配方案的优化过程,该过程评估每种方案的损耗和芯片结温。由于 HyS 模块多使用产品化 Si IGBT 芯片和 SiC MOSFET 芯片,计算并不复杂。

与独立器件相比,功率模块可有效降低杂散损耗,也能够带来更好的散热。特别对于超过 30kW 的中、大功率应用,在功率模块内部实现多芯片的并联,其效果要好于通过母排并联多个独立器件。

文献[19]给出了 HyS 功率模块设计要点和案例,实现了一款 1200V/200A 模块的布局优化。该模块是桥臂模块,每个桥臂由 1 个 50A SiC MOSFET 芯片、2 个 100A Si IGBT 芯片、1 个 150A Si Diode 组成。为降低门极回路阻抗,预留了 kelvin 门极端子。

受 Si 芯片限制,该模块的设计目标为支持芯片结温 175°C,首先选取了有关的封装材料,具体见表 2。为了进一步降低寄生阻抗,该模块使用超声波焊接技术连接 DBC 与功率端子和信号端子。

表 2 HyS 模块封装材料^[14]

Tab. 2 Material selection for HyS module^[14]

部件	材料说明
底板	3mm 厚 Al SiC 基板带有 8mm pinfin
基板	AlN DBC, 15mils 厚 AlN 层, 8mils 厚铜层
焊片	80% 金 20% 锡焊片 (280°C 熔点)
键合线	门极 6mils 铝线, 其他部分使用 15mils 铝线
灌封胶	Nusil R-2188
功率端子	0.8mm 厚铜端子
信号端子	直径 1mm 铜端子

在模块设计阶段,采用了基于遗传算法的自动布局优化方法,对设计空间进行有向性搜索,充分考虑了寄生电感、并联芯片的均流、体积、散热、门极信号与主回路的解耦。最终布局的图案如图 6 所示,模块样件如图 7 所示。

为了验证布局优化结果,作者采用有限元软件 Q3D 抽取了杂散电感,杂散电感如图 8 所示,并采用双脉冲测试的方法检测了模块的开关特性,其结果与设计一致。该模块用于本文第 5 节的 3.4kW 无线充电变频器。

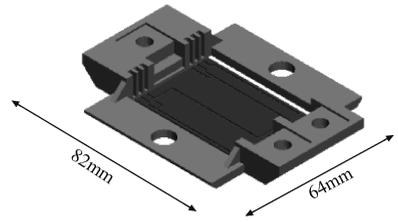


图 6 HyS 模块结构^[19]

Fig. 6 Hybrid module layout design^[19]

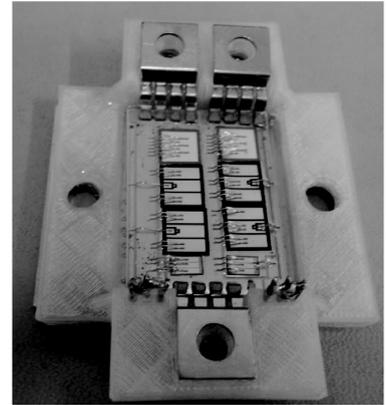


图 7 HyS 模块^[19]

Fig. 7 Hybrid module prototype^[19]

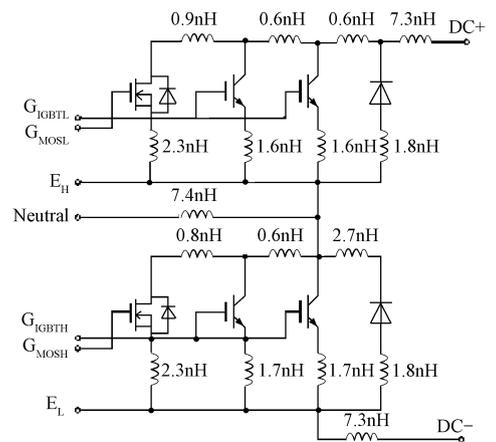


图 8 HyS 杂散电感^[19]

Fig. 8 Parasitic inductances of HyS power module^[19]

除了设计开发混合开关模块,还可利用现有的 SiC MOSFET 模块或 Si IGBT 模块,用母排进行器件间的连接^[15,29]。此方法需要良好的母排设计才能尽可能降低相关寄生阻抗,散热设计也需兼顾不同器件间的平衡。图 9 给出了 IGBT 模块与 MOSFET 独立器件的配合案例,图 10 给出了 SiC MOSFET 模块与 Si IGBT 模块的配合案例,具体的母排设计细节和连接方法可以参考文献[15]和文献[29]。

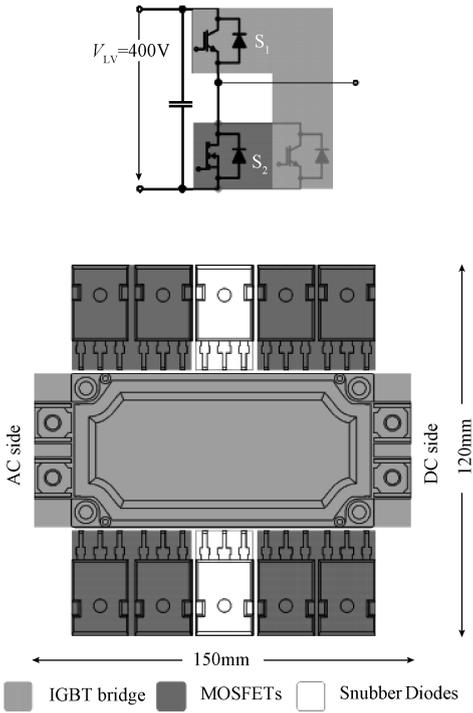


图 9 Si IGBT 模块与 SiC 独立器件的配合案例

Fig. 9 HyS with IGBT module and discrete SiC MOSFET

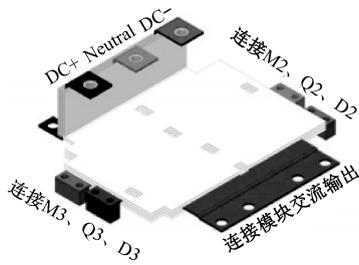


图 10 SiC MOSFET 模块与 Si IGBT 模块的配合案例

Fig. 10 HyS with IGBT module and SiC module

对于高压 HyS 器件来说功率模块是必不可少的,高压模块的应用对象功率普遍较大,还需要考虑局部放电、散热等一系列问题,很难用独立器件完成。图 11 和图 12 分别给出了 3.3kV HyS 模块和 6.5kV HyS 模块的布局案例^[20,22]。这些文献还验证了高压 HyS 的高速开关特性,有望用于未来电网。因为高压芯片的电流普遍较小,普遍需要大数量芯片并联才能达到所需要的电流,其特性有待进一步验证。

5 基于 HyS 的变频器

迄今为止基于 HyS 的变频器还处于研究阶段,尚无小规模示范应用。受到独立器件限制,很多文

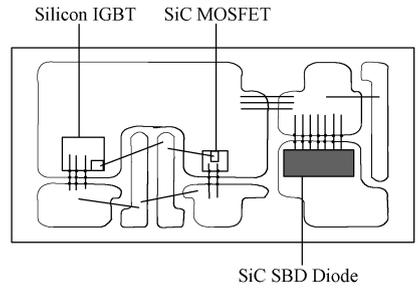


图 11 3.3kV 混合模块布局^[20]

Fig. 11 Layout design of 3.3kV hybrid module^[20]

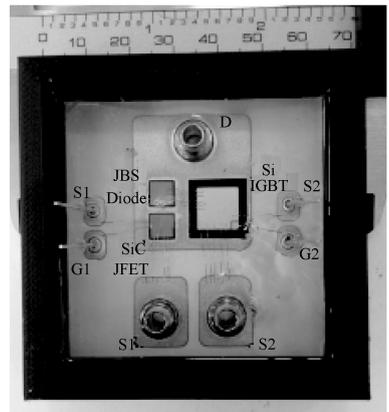


图 12 4.5kV 混合模块布局^[22]

Fig. 12 Layout design of 4.5kV XT hybrid module^[22]

献只对 HyS 器件进行了双脉冲实验。相对于纯 Si 变频器或纯 SiC 变频器,HyS 变频器系统复杂度较高,本节对相关文献工作总结如下。

第一例是 3.4kW 无线充电用逆变器,如图 13 所示,详细的设计和测试可参考文献^[23]。

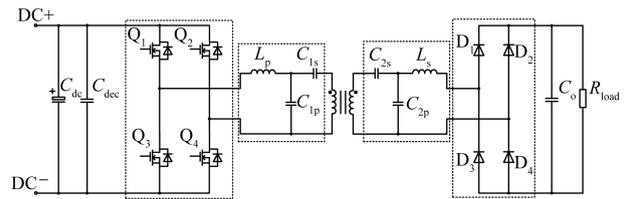


图 13 无线充电系统原理图^[19]

Fig. 13 Wireless power transmission system with HyS module^[19]

该系统使用 2 个 HyS 桥臂模块实现 H 桥拓扑,运行于 50kHz,峰值功率达到 3.4kW,部分波形如图 14 所示。在测试中 Si IGBT 良好地实现了 ZVS,系统损耗较低。

第二例使用独立器件搭建了 Boost 变频器^[18],如图 15 所示。该系统使用 650V 的 SiC MOSFET 和 Si IGBT 实现了 1:5 的电流配比,运行于 20kHz。该文献

还对 HyS 变频器的电磁兼容特性进行了测试和分析。相关电磁兼容的研究可进一步参考文献[23]。

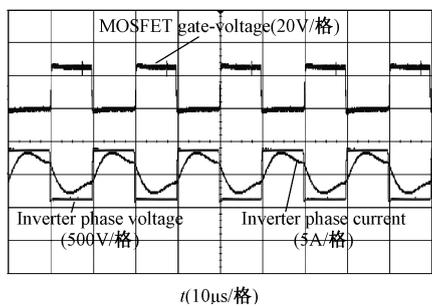


图 14 无线充电系统实验波形图^[19]

Fig. 14 Experimental results of wireless power transmission system^[19]

对单相器件进行了测试,实现了 28kHz 和 17.5kV·A 运行。

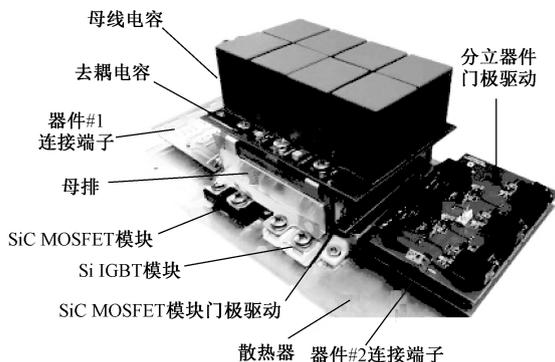


图 17 三电平 T 型模块^[26]

Fig. 17 Three-level T-type power electronics building block using HyS^[26]

以上几个 HyS 变频器都展示了 SiC/Si 混合开关器件的优异特性,在 SiC 器件产品价格降低到接近 Si 器件之前,该类变频器有一定应用前景,特别是对于同时要求较高开关频率和中、大输出功率的应用。

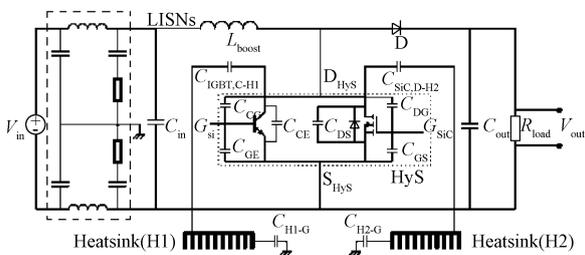


图 15 Boost 变换器原理图^[18]

Fig. 15 DC-DC boost converter with HyS^[18]

第三例是采用强制风冷的三相逆变器,由 3 个 HyS 桥臂模块组成,实现了 30kHz 开关频率,功率达到 5kW^[23],如图 16 所示。在后续的水冷升级版硬件中,该系统达到了 15kW。

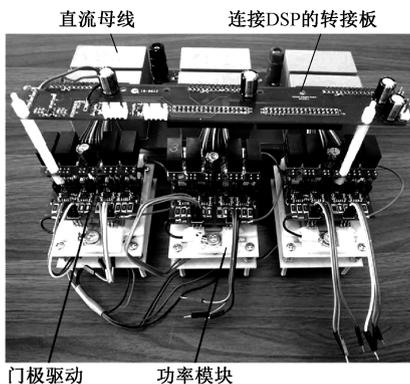


图 16 风冷三相逆变器^[23]

Fig. 16 Forced air cooled three phase inverter based on HyS^[23]

6 HyS 的成本分析

相比于纯 SiC 器件,HyS 的最大优势来自成本。文献[21]中对比了现有 SiC MOSFET 和 Si IGBT 产品器件的价格,分为独立器件部分和模块部分,如表 3 和表 4 所示。

从表 3 和表 4 中可以看出同规格 SiC MOSFET 器件的价格是 Si IGBT 器件的 5~8 倍,图 18 给出了更为直观的对比。

对于中、大功率应用,单器件 1200V/800A 纯 SiC MOSFET 模块的成本为 2500 \$ 左右,1200V/300A HP1 封装的三相纯 SiC MOSFET 模块成本为 7000 \$ 左右,对于许多应用来说仍难以接受。使用 HyS 器件能够大幅降低成本,达到纯 SiC MOSFET 模块成本的 1/4 左右^[21],如图 19 所示。

文献[25]尝试使用更低的 SiC/Si 配比,达到 1:6,使 HyS 器件的成本更接近 Si IGBT 器件。然而这种配比缺乏相关散热验证,需要进一步验证变频器的性能。

第四例采用了三电平 T 型模块,如图 17 所示,由 SiC MOSFET 模块与 Si IGBT 模块配合组成 HyS,设计目标是 100kW 的变频器。文献[17]中

对于高压 HyS,成本预测结果与低压模块类似^[22],高压混合器件价格如表 5 所示。文献中普遍缺乏商业化高压 SiC 芯片成本的准确数据,还需要在实际应用中进行核实。

表 3 模块价格对比^[21]

Tab.3 Price comparison of SiC and Si modules^[21]

厂家产品型号和种类	规格	结构	每片价格(\$)/起订片数
Infineon SiC MOSFET DF11MR12W1M1_B11	1200V 50A	Boost	119.04/1片;107.88/25片
Rohm SiC MOSFET BSM180D12P3C007	1200V 180A	桥臂	506.97/1片;476.42/5片
Rohm SiC MOSFET BSM300D12P2E001	1200V 300A	桥臂	668.18/1片; 654.43/5片
CREE/Wolfspeed SiC CAS120M12BM2	1200V 193A	桥臂	330/1片
Infineon Si IGBT FF400R12KT3	1200V 580A	桥臂	145.33/1片; 136.38/25片
Microsemi APTGLQ400A120T6G	1200V 625A	桥臂	184.36/100片

表 4 独立器件价格对比^[21]

Tab.4 Price comparison of SiC and Si discrete devices^[21]

厂家产品型号	电压、种类	100℃下额定电流/A	每片价格(\$)/起订片数
ST SCT50N120	1200V SiC MOSFET	50	35.13/1片;30.95/25片
IXYS IXFN70N120SK	1200V SiC MOSFET	48	109/1片;99.14/25片
CREE C2M0025120D	1200V SiC MOSFET	60	69.8/1片;67.12/100片
Rohm SCT3030KL	1200V SiC MOSFET	51	44.21/1片;39.52/25片
Microsemi APT80SM120J	1200V SiC MOSFET	40	78.36/1片;66.49/100片
Infineon IGW60T120FKSA1	1200V Si IGBT	60	7.12/1片;5.33/100片
IXYS IXYH82N120C3	1200V Si IGBT	82	13.44/1片;8.52/1000片

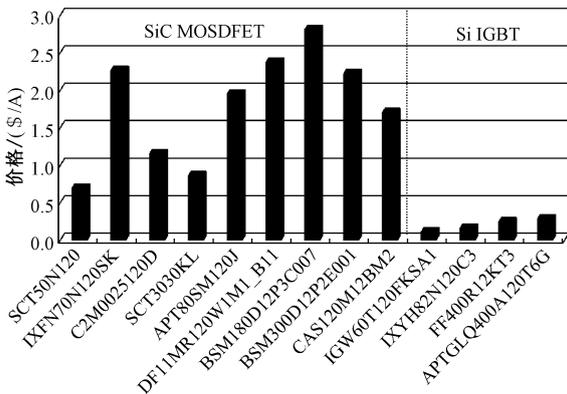


图 18 SiC MOSFET 和 Si IGBT 价格对比

Fig.18 Price of SiC MOSFET and Si IGBT

表 5 高压混合器件价格^[15]

Tab.5 Costs of high voltage HySs^[15]

	电流配比	SiC/Si 芯片成本比	相对于 Si 器件成本提高(%)
HyS1	10:2	4:1	50.0
HyS2	10:3	4:1	69.2
HyS3	10:4	4:1	85.7

由于 HyS 需要使用更加高性能且复杂的门极驱动芯片,在讨论 HyS 成本问题的时候应该注意包含这一部分。HyS 所需门极驱动芯片的特点主要包括大驱动电流、高 dv/dt 抑制能力、短时间延迟、具有保护功能、具有米勒钳位功能等,一些常用驱动芯片的价格见表 6。

表 6 驱动芯片价格^[19]

Tab.6 Costs of gate driver ICs^[19]

型号	峰值电流 /A	dv/dt 抑制 / (kV/ μ s)	时间延迟 /ns	米勒钳位	过流保护	成本/\$
ACPL-332J	2.5	15	180	$V_{EE} + 2V$	有	4.67
HCPL-316J	2.0	15	300	无	有	4.76
FOD8318	2.5	35	300	$V_{EE} + 2.2V$	有	4.03
TLP5214	4.0	35	150	$V_{EE} + 3V$	有	6.23
1ED020I12	2.0	50	170	$V_{EE} + 2.1V$	有	5.87
MC33153	1.0	不明	80	无	有	1.63
BM6102FV-C	4.5	100	200	$V_{EE} + 2V$	有	12.0
STGAP1S	5.0	50	100	GND + 2V	有	13.2

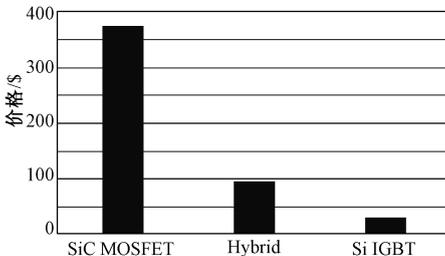


图 19 同等规格 SiC MOSFET、Si IGBT 与 HyS 模块价格对比

Fig.19 Cost comparison of HyS module

7 结论

本文综述了 SiC MOSFET/Si IGBT 混合开关器件,可以实现 Si IGBT 的零电压开通和零电压关断,大幅缩短 Si IGBT 的拖尾电流时间,降低开关损耗,并可实现高频运行。该类混合开关模块利用了 Si IGBT 的导通特性优势和成本优势,与同规格纯 SiC 模块相比成本大幅降低。

本文总结了现有文献,分别介绍了门极驱动时序、门极驱动硬件设计、电流分配优化、功率模块设计、变频器设计和相关成本。文献中的测试结果和样机显示了 HyS 良好的特性,在 SiC 器件产品的价格降低到接近 Si 器件之前,HyS 器件具有一定应用前景,特别对于同时要求较高开关频率和中、大功率等级的应用。

参考文献 (References):

- [1] Wang F, Zhang Z. Overview of silicon carbide technology: Device, converter, system, and application [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2016, 1 (1): 13-32.
- [2] Olejniczak K. Advanced low-cost SiC and GaN wide bandgap inverters for under-the-hood electric vehicle traction drives [R]. 2016.
- [3] Olejniczak K, Flint T, Simco D, et al. A compact 110kV·A, 140°C ambient, 105°C liquid cooled, all-SiC inverter for electric vehicle traction drives [A]. IEEE APEC [C]. 2017. 735-742.
- [4] Yole Market and technology. SiC modules, devices and substrates for power electronics market [R]. 2016.
- [5] 第三代半导体产业技术创新战略联盟 (China advanced semiconductor industry innovation alliance). 第三代半导体产业发展年度报告 (2017) (The development of Chinese advanced semiconductor 2017 annual report) [R]. 2018.
- [6] Ning P, Li L, Wen X, et al. Review of Si IGBT and SiC MOSFET based hybrid switch [A]. APCSCRM [C]. 2018. 1-7.
- [7] Hayes J, George K, Killeen P, et al. Bidirectional, SiC module-based solid-state circuit breakers for 270 VDC MEA/AEA systems [A]. IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications [C]. 2016. 70-77.
- [8] Ogawa E, Kawabata J, Kusunoki Y, et al. The new high power density 7th generation IGBT module for compact power conversion systems [A]. 2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG) [C]. 2015. 1-6.
- [9] Qian Jinrong, Khan A, Batarseh I. Turn-off switching loss model and analysis of IGBT under different switching operation modes [A]. IEEE Industrial Electronics, Control, and Instrumentation [C]. 1995. 1-8.
- [10] Wang H, Jiang D. Design of high temperature gate driver for SiC MOSFET for EV motor drives [A]. 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific) [C]. 2017. 1-6.
- [11] Rahman M F, Niknejad P, Barzegaran M R. Comparing the performance of Si IGBT and SiC MOSFET switches in modular multilevel converters for medium voltage PMSM speed control [A]. IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC) [C]. 2018. 1-8.
- [12] Rahimo Munaf, Canales Francisco, Minamisawa Renato Amaral, et al. Characterization of a silicon IGBT and silicon carbide MOSFET cross-switch hybrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (9): 4638-4642.
- [13] Deshpande Amol, Luo Fang. Design of a silicon-WBG hybrid switch [A]. IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WIPDA) [C]. 2015. 296-299.
- [14] Deshpande Amol, Luo Fang. Comprehensive evaluation of a silicon-WBG hybrid switch [A]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) [C]. 2016. 1-8.
- [15] Ortiz G, Gammeter Ch, Kolar J W, et al. Mixed MOSFET-IGBT bridge for high-efficient medium frequency dual active bridge converter in solid state transformers [A]. IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL) [C]. 2013. 1-8.
- [16] Qin Haihong, Wang Dan, Zhang Ying, et al. Characteristics and switching patterns of Si/SiC hybrid switch [A]. IEEE International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management [C]. 2017. 1-6.
- [17] He J, Katebi R, Weise N. A current-dependent switching strategy for Si/SiC hybrid switch-based power converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (10): 8344-8352.
- [18] Wang Jun, Jiang Xi, Li Zongjian, et al. Short circuit ruggedness and failure mechanisms of Si/SiC hybrid switch [J]. IEEE Transactions on Power Electronics Early Access, 2018.
- [19] Li L, Ning P, Wen X, et al. Gate drive design for a hybrid Si IGBT/SiC MOSFET module [A]. IEEE Wipda Asia [C]. 2018. 1-8.

- [20] Rahimo M, Canales F, Minamisawa R A, et al. Characterization of a silicon IGBT and silicon carbide MOSFET cross-switch hybrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (9): 4638-4642.
- [21] Ning Puqi, Li Lei, Wen Xuhui, et al. A hybrid Si IGBT and SiC MOSFET module development [J]. IEEE CES Transaction on Electrical Machines and Systems, 2017, 1 (4): 360-366.
- [22] Huang A Q, Song X, Zhang L. 6.5 kV Si/SiC hybrid power module: An ideal next step? [A]. IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP) [C]. 2015. 64-67.
- [23] 段卓琳, 范涛, 张栋, 等 (Duan Zhuolin, Fan Tao, Zhang Dong, et al.). 全 SiC 三相逆变器传导电磁干扰建模与预测 (Modeling and prediction of electromagnetic interference in whole SiC three phase inverters) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (1): 1-7.
- [24] Yin Shan, Tseng K J, Tong C F, et al. Switching characterization of SiC half bridge module for high power density converter [A]. IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC) [C]. 2015. 1-6.
- [25] Deshpande A, Luo F. Practical design considerations for a Si IGBT + SiC MOSFET hybrid switch: Parasitic interconnect influences, cost and current ratio optimization [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, Early Access, 2018. 10.1109/TPEL.2018.2827989.
- [26] Deshpande Amol, Chen Yingzhuo, Narayanasamy Balaji, et al. A three-level, T-type, power electronics building block using Si-SiC hybrid switch for high-speed drives [A]. IEEE APEC [C]. 2018. 2609-2616.
- [27] Ueno S, Kimura N, Morizane T, et al. Study on characteristics of hybrid switch using Si IGBT and SiC MOSFET depending on external parameters [A]. IEEE EPE [C]. 2017. 1-10.
- [28] Rahimo Munaf, Canales Francisco, Minamisawa Renato Amaral, et al. Characterization of a silicon IGBT and silicon carbide MOSFET cross-switch hybrid [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2015, 30 (9): 4638-4642.
- [29] Ortiz G, Gammeter C, Kolar J W, et al. Mixed MOSFET-IGBT bridge for high-efficient medium-frequency dual-active-bridge converter in solid state transformers [A]. IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics [C]. 2013. 1-8.

Summary of Si IGBT/SiC MOSFET based hybrid switching device

NING Pu-qi^{1, 2, 3, 4}, LI Lei^{1, 2, 3, 4}, CAO Han^{1, 2, 3, 4}, WEN Xu-hui^{1, 2, 3, 4}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper summarized Si IGBT/SiC MOSFET based hybrid switch (HyS) from literatures. The related gated drive pattern, gate drive hardware, current sharing optimization, module design, converter design and cost are introduced and commented in this paper. In HyS, Si IGBTs can realize zero voltage switching (ZVS), and the tailed current can be reduced. ZVS can reduce power loss and increase the switching frequency. HyS also combines low conduction loss and low cost of Si IGBT. The promising high performances of HyS will bring considerable achievement to enhance power frequency and high power converter systems.

Key words: Silicon Carbide device; hybrid switch; gate drive; power module; power converter