

SiC MOSFET在光伏发电系统中的应用

熊新, 曾建友

深圳市禾望电气股份有限公司, 深圳 518000

摘要: 本文通过介绍SiC材料及SiC功率器件特性, 指出SiC功率器件非常适合高频、高压化。文章通过设计一台额定输入功率5.4kW、开关频率30kHz的光伏boost变换器, 分析计算SiC-MOSFET损耗远低于Si-MOSFET和Si-IGBT损耗。使用SiC-MOSFET的光伏发电系统具有转换效率高、发电量高的优势。文章最后分析SiC-MOSFET并联震荡问题, 并提出了一些解决方法及建议。

关键词: SiC-MOSFET, 光伏发电, 效率, 并联驱动震荡

The Application of SiC MOSFET in PV Systems

XIONG XIN, ZENG JIANYOU

Shenzhen Hopewind Electric Co. Ltd., Shenzhen 518055

Abstract: By introducing characteristic of SiC material and SiC Power Mosfet, this paper verified that SiC Power Mosfet is applicable for high frequency and high voltage situation. Besides, by designing a 5.4kW, 30kHz boost DC-DC converter, this paper analysed and calculated that power loss of SiC-MOSFET is much lower than that of Si-IGBT and Si-MOSFET, The advantage of applying SiC-MOSFET lies in higher conversion efficiency and producing more power. At the end of this paper, we analysed the problem of parallel driving oscillation, and proposed some methods and suggestions to resolve the problem.

Keywords: SiC-MOSFET, PV generation, Conversion efficiency, Parallel driving oscillation

1 引言

现代电力电子技术以高压、高频方向为发展趋势。Si-IGBT虽然可以做到高压, 但其开关频率受到限制, 很难高频化。Si-MOSFET虽然可以达到高频化, 但其最大工作电压受到限制。SiC材料的功率器件已很难满足电力电子技术高压、高频化的发展趋势。比起Si半导体材料, SiC半导体材料具有更高的禁带宽度、更高的雪崩临界击穿电场、更高的热导率等优点, 故SiC功率器件是高压、高频化的最佳选择。随着SiC技术的成熟, 目前SiC功率肖特基二极管及SiC-MOSFET已经商业化, 较大规模的应用在电力电子行业的各个领域。

尽管SiC-MOSFET具有损耗低、转换效率高等优势, 但在具体应用时, SiC-MOSFET也存在一些问题。在使用SiC-MOSFET时, 驱动串扰及并联驱动震荡问题值得

关注及研究。

2 SiC材料及SiC功率器件的特性

SiC材料的一个显著特点就是同质多型, 根据堆垛次序不同, 将立方型称为3C-SiC, 六方结构标记为2H-、4H-、6H-SiC等, 菱面体标记为15R-、21R-、27R-SiC等。制作器件最常用的SiC材料是3C-、4H-、6H-这三种结构, 其中4H-SiC材料更受制造商青睐, 很多商业化SiC功率器件都使用4H-SiC材料^[1]。

SiC以其良好的电学特性已成为制作高温、高压、高频大功率器件的一种最具有优势的半导体材料, 其优势已远远超出Si材料半导体功率器件^[2]。与Si、Ge半导体材料相比, 宽禁带半导体SiC良好的电学特性。表1给出了SiC与Si半导体材料的特性参数。

表 1 SiC 与 Si 半导体材料的电学特性 (室温 300K)

材料参数	4H-SiC	6H-SiC	3C-SiC	Si
禁带宽度 (eV)	3.28	3.08	2.35	1.12
临界击穿电场 (MV/cm)	3	1	0.8	0.25
热导率 (W/cm ² *K)	4.9	4.9	4.9	1.5
饱和电子漂移速率 (cm/s)	2.7e7	2.7e7	2.7e7	1.0e7
介电常数	9.7	9.7	9.7	11.8
最高工作温度 (°C)	~700	~700	~700	~230

(1) SiC 功率器件具有更高的击穿电压表 1 中, 4H-SiC 半导体材料击穿电场是 Si 半导体材料的十倍左右, 故在同等工艺尺寸下, SiC 功率器件具有更高的击穿电压。商业化 Si 的肖特基二极管 (SBD) 通常在耐压在 300V 以下, 而 CREE 公司早已推出了 1200V/18A 的 SiC SBD。常用的 Si MOSFET 电压通常在 1000V 以下, 而首个 SiC MOSFET 电压定额为 1200V。表 2 为几款 SiC MOSFET 及 SiC 肖特基二极管型号及其电压电流参数。

表 2 几款主流 SiC-MOSFET 及 SiC-SBD

器件型号	器件类型 / 封装	额定电压	额定电流
C4D10120D	SiC-SBD/TO-247	1200V	18A@25°C
C2M0080120D	SiC-MOSFET/TO-247	1200V	32A@25°C
SCS220KE2	SiC-SBD/TO-247	1200V	20A@25°C
SCT2080KE	SiC-MOSFET/TO-247	1200V	35@25°C

在高压 buck 或 boost 变化器中, 受电压等级的限制, 往往无法使用 Si 肖特基二极管, 一般使用反向恢复时间较大的 PIN 功率二极管。PIN 功率二极管反向恢复特性较差, 其开关损耗较大、管子电压应力较大, 系统开关频率往往不能超过 5kHz^[3]。如果考虑使用 SiC-SBD 的话, 则开关频率可以得到显著提高, 使其开关频率提升到 10kHz 或更高。文献 [4] 中指出使用 SiC-SBD 代替 PIN 功率二极

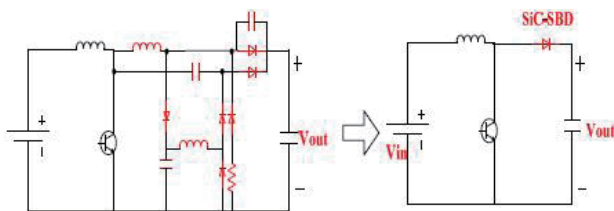


图 1 使用 SiC-SBD 简化 boost 变换器

管来简化 boost-PFC 电路中用来阻塞反向恢复能量的无源吸收电路, 减少了多个元器件, 增加系统的可靠性。

(2) SiC 功率器件具有更低的导通电阻高功率应用中, 单极半导体器件的比导通电阻定义为器件电阻与器件有效面积得乘积。比导通电阻用 $R_{sp,on}$ 表示^[1], 其表达式为式 (1)

$$R_{sp,on} = \frac{4V_B^2}{\mu\zeta_s E_c^3} \quad (1)$$

其中, E_c 为临界雪崩击穿电场, V_B 为对应的雪崩击穿电压, μ 为电子迁移率, ζ_s 为介电常数。

把表 1 的相关参数代入式 (1), 与 Si 材料相比, 4H-SiC 的临界击穿电场大约是硅的 10 倍, 对于给定的击穿电压, 比导通电阻将减小约 3 个数量级。因此 SiC 材料以其优越的电学特性使其在高功率、高压、高温应用中具有很大的优势。目前, 商业化 SiC-MOSFET 已经达到 1700V, 而 Si-MOSFET 通常应用于 1200V 电压等级以内, 以避免过大的器件导通损耗。

表 3 可以看出, SiC-MOSFET 的导通电阻明显要低于 Si-MOSFET 的导通电阻。

表 3 SiC-MOSFETS 与 Si-MOSFET 导通电阻比较

器件型号	器件类型 / 封装	电压电流参数	导通电阻
IXTH12N120	Si-MOSFET / TO-247	1200V/12A	1.4Ω @25°C
IXFX20N120	Si-MOSFET / TO-247	1200V/20A	0.75Ω @25°C
C2M0080120D	SiC-MSFET / TO-247	1200V/32A	80mΩ @25°C
C2M0160120D	SiC-MSFET / TO-247	1200V/18A	160mΩ @25°C

(3) SiC 功率器件具有更低的结 - 壳热阻。

由于 SiC 材料的热导率是 Si 材料的 3 倍以上, 因此 SiC 功率器件散热特性更加, 器件温升上升更慢。

(4) SiC 功率器件可以在更高的温度下工作。

由于 SiC 材料禁带宽度是 Si 材料的 3 倍, SiC 功率器件工作温度理论上可以达到 700°C, 远远高于 Si 材料的工作温度。但是目前受封装技术的影响, 大多数只能做到 175°C 的工作温度^[1]。

同等电压等级下, SiC 功率器件具有更低的导通电阻, 故 SiC 材料更有助于功率器件高压化。同时, SiC 功率器件具有更低的结壳热阻、更高的工作温度等优势。SiC 功率器件是电力电子器件高压、高频化的最具有竞争力的选择。

3 SiC-MOSFET 在光伏系统中的应用

3.1 SiC-MOSFET 及 Si 开关管效率对比

SiC 功率器件以其高频、高压化特点应用在电力电子的不同产品中。同样,在光伏发电系统中 SiC 功率器件也得到越来越多的应用。比起 Si-MOSFET 和 Si-IGBT, SiC-MOSFET 有着明显的低损耗优势。下面以二级式光伏逆变系统中的 boost 变换器来对比 SiC-MOSFET 及 Si-MOSFET (Si-IGBT) 的损耗。boost 参数如下:

- 1) 额定输入电压: 600VDC
- 2) 额定输入功率: 5.4kW
- 3) 输出母线电压: 820VDC
- 4) 开关频率: 30kHz
- 5) 升压电感: 1.2mH (电路工作在 CCM 状态下)

选取电压电流等级基本相当的 Si-IGBT、Si-MOSFET、SiC-MOSFET 各一款,分析对比三者的损耗。表 4 为影响开关管损耗的一些重要电气参数。

通过进一步查找器件资料手册及计算分析,在上述性能参数的 boost 变换器中,各功率开关管的损耗计算结果如表 5 所示。

从表 5 可以看出, Si-IGBT 尽管有着较低的导通损耗,但其开关损耗很大,不易高频工作。Si-MOSFET 较

Si-IGBT 有着更低的开关损耗,但导通损耗较高。SiC-MOSFET 的开关损耗及导通损耗都很低,其总损耗远远低于 Si-IGBT 及 Si-MOSFET。对于额定输入功率为 5.4kW 的 boost 变换器, FGA25N120ANTD 的损耗占整机容量的 1.26%, IXFK20N120 的损耗占整机容量的 0.55%, 碳化硅 C2M0160120D 的损耗仅占整机容量的 0.16%。可见,使用 SiC-MOSFET 的光伏发电系统具有很高的转换效率。在实际产品中,一台额定输入功率 86kW 的 boost 光伏控制器(多个 boost 变换器并联),使用 SiC 功率管后,整机最大转换效率可达 99.4%。

3.2 SiC-MOSFET 并联问题

在光伏 boost 变换器中,可能会由于单个 MOSFET 的电流容量不够的原因,采用多个 MOSFET 并联方法来提高管子的电流容量。SiC-MOSFET 的导通阻抗具有正温度系数,具有自均流能力,故 SiC-MOSFET 并联使用时,可以不用增加均流策略。不过,文献 [5] 及文献 [6] 提及的开关管并联电路的驱动震荡问题值得注意。因为,根据文献 [5] 的结论,驱动震荡问题在 SiC-MOSFET 并联电路中会更加明显。

图 2 双 MOSFET 并联等效电路中,文献 [5] 指出,在栅极寄生电感 L_{g1} 、 L_{g2} ,管子的寄生电容 C_{gd1} 、

表 4 各款 MOSFET 的部分电气参数

型号	FGA25N120ANTD	IXFK20N120	C2M0160120D
参 数	Si-IGBT/TO-247	Si-MOSFET/TO-247	SiC-MOSFET/TO-247
VDS/V	1200	1200	1200
ID/A	25A @25°C	20A @25°C	18A @25°C
RDS(on)/mΩ	80	750	160
Qg/nC	300	160	32.6
Ciss/pF	3700	7400	527
Coss/pF	130	550	47
Crss/pF	80	100	4
tcross_on/ns	110	70	14
tcross_off/ns	350	95	25

表 5 各款功率开关管的损耗计算数据

型号	FGA25N120ANTD	IXFK20N120	C2M0160120D
损 耗	Si-IGBT/TO-247	Si-MOSFET/TO-247	SiC-MOSFET/TO-247
开关损耗 (W)	67.0	20.7	5.2
导通损耗 (W)	1.0	9.2	3.7
总损耗 (W)	68.0	29.9	8.9

C_{gd2} 和驱动电阻 R_{g1} 、 R_{g2} 之间存在震荡回路。当 MOS 管关断过程中, 驱动可能产生震荡, 损耗 MOS 管。文献 [5] 中定义 LCR 电路中产生震荡现象的衡量标准 Q (式 2), 当 $Q > 0.5$ 时, 电路容易产生震荡。

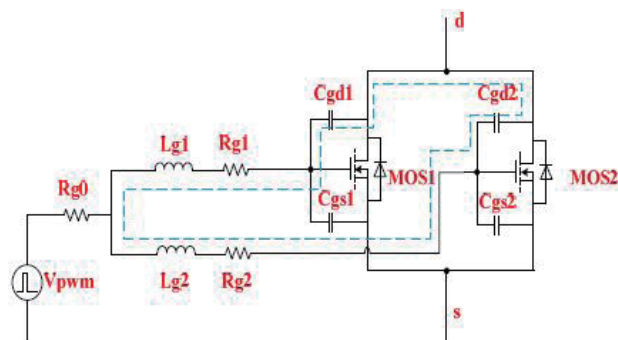


图 2 双 MOSFET 并联等效电路

$$Q = \frac{1}{(R_{g1} + R_{g2})} \sqrt{\frac{L_{g1} + L_{g2}}{C_{gd1} + C_{gd2}}} \quad (2)$$

从式 (2) 可以看出, 加大驱动电阻或减小栅极寄生电感可以避免驱动震荡。文献 [6] 中采用图 3 所示的共用驱动电阻的并联方案导致炸机, 其原因是式 (2) 中电阻 R_{g1} 、 R_{g2} 很小 (忽略线路阻抗的话, 若 MOS 管没有内置的驱动电阻的话, 则 R_{g1} 、 R_{g2} 为零), Q 很大, 引起驱动震荡导致管子失效。

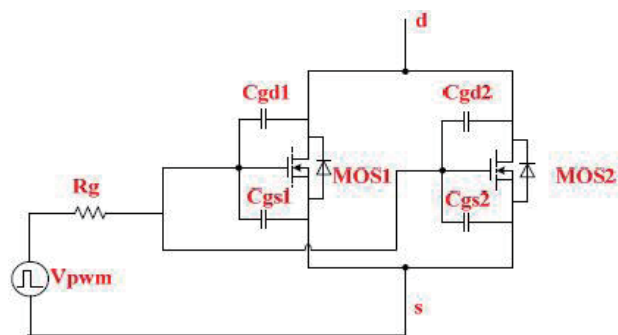
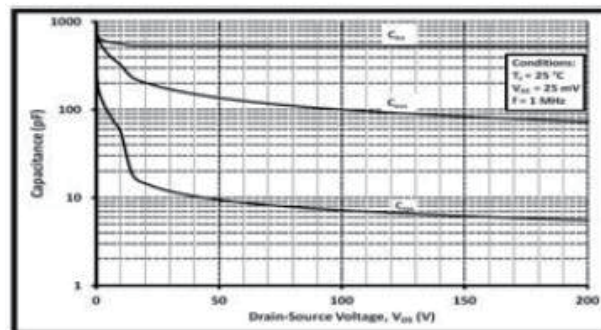
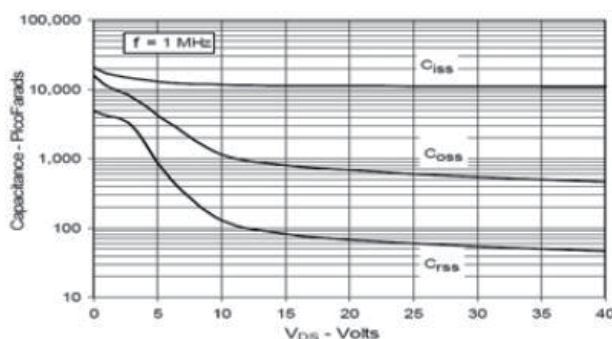


图 3 不恰当的 MOSFET 并联电路

另外, 管子的寄生电容 C_{gd} 越小, Q 越大, 电路越容易震荡。由于 SiC 开关管的寄生电容 C_{gd} (C_{rss}) 比 Si 开关管的小很多 (图 4), 故驱动震荡问题在 SiC-MOSFET 并联电路中显得更为突出, 设计电路时, 必须加以考虑。通过控制 PCB 线路寄生电感、选择合适的驱动电阻等方法避免并联驱动震荡的发生。



(a) SiC-MOSFET (C2M0080120D)



(b) Si-MOSFET (IXFK20N120)

图 4 SiC-MOSFET 及 Si-MOSFET 电容 C_{rss}

4 结论

本文分析 SiC 材料的优良特性, 指出 SiC 功率器件非常适合高频、高压化。在光伏发电系统应用中, SiC-MOSFET 的损耗明显低于 Si-MOSFET 及 Si-IGBT。使用 SiC-MOSFET 的 boost 变换器具有损耗低, 发电量高等优势。SiC-MOSFET 导通阻抗具有正温度系数, 很适合并联使用, 但实际应用中驱动震荡问题值得关注。

参考文献

- [1] 碳化硅半导体材料与器件 / (美) 舒尔 (Shur, M.) 等主编; 杨银堂, 贾护军, 段宝兴译. 北京: 电子工业出版社, 2012. 8.
- [2] SIERGIEJRR, CLARKERC, etc. advance in SiC Materials and Devices: An Industrial Point of View. Materials Science and Engineering, 1999, B61-62: 9-17.