

SiC MOSFET短路特性以及短路保护方法

AN-15-0011

作者：Xiaowen Jiang



SiC MOSFET短路特性以及短路保护方法

摘要

在光伏逆变器、车载充电器以及牵引逆变器等应用中，SiC MOSFET逐渐成为Si IGBT的替代产品。与Si IGBT相比，SiC MOSFET由于器件特性，对短路保护能力提出了更高的要求。本文从SiC MOSFET的短路特性出发，比较了SiC MOSFET与Si IGBT的短路特性差异的原因，并给出了SiC MOSFET的短路保护方法，最后结合纳芯微栅极驱动产品给出了去饱和检测的设计方法。

目录

1. SiC MOS短路特性介绍	2
2. SiC MOS短路保护方法	2
2.1.分流电阻检测	3
2.2.带电流检测的功率器件	4
2.3.退饱和检测	4
2.3.1.DESAT功能介绍	4
2.3.2.基于SiC应用的DESAT设计考虑	5
3. 修订历史	9

SiC MOSFET短路特性以及短路保护方法

1. SiC MOS短路特性介绍

在电力电子的很多应用，有时会出现短路的工况，这对功率器件要求一定的抗短路能力，即可以在一定的时间内承受短路电流而不发生损坏。市面上大部分IGBT都在Datasheet中标注出短路能力，一般为5-10us；而SiC MOSFET的短路能力比较短，一般在2us左右，且大部分的SiC MOSFET甚至都没有标出短路能力。

Si IGBT与SiC MOSFET的短路能力的差异可以从以下两方面进行分析：

- 1) 相同阻断电压以及电流额定值的Si IGBT与SiC MOS，由于SiC材料的临界击穿场强，因此SiC MOS的芯片面积更小，电流密度高，发热更加集中。
- 2) SiC MOS 与Si IGBT的输出特性存在差异。如图1.1所示，IGBT通常情况下在饱和区工作；当发生短路时，集电极电流 I_c 迅速增加，从饱和区急剧转为线性区，且集电极电流不受 V_{CE} 电压影响，因此短路电流以及功耗增加会受到限制。而对于SiC MOS，如图1.2，正常工作期间工作在欧姆区；当发生短路时，从欧姆区进入饱和区的拐点并不明显，且饱和区电流随 V_{ds} 电压增加，因此器件电流以及功耗增加不受限制。因此SiC MOS的短路保护设计尤为重要。

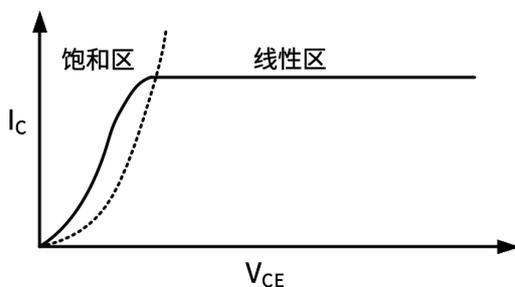


图1.1 IGBT输出特性曲线

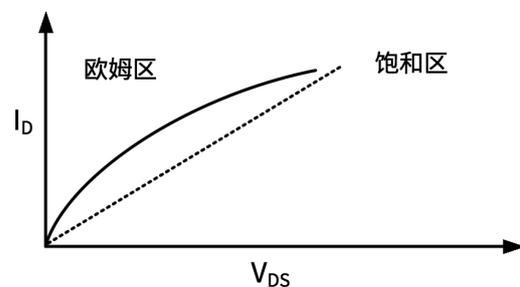


图1.2 SiC MOS输出特性曲线

2. SiC MOS短路保护方法

短路保护对于保证系统稳健以及充分利用器件非常重要，合格的短路保护措施可以快速响应并关断器件，同时也不会引起误触发。常见的短路保护方式分为电压检测和电流检测两种类型：电流检测的方式通常是通过分流电阻或者SenseFET的方式，而电压检测的方式则是退饱和保护，也就是DESAT保护。下面对这三种方法进行介绍，并阐明了优缺点。

SiC MOSFET短路特性以及短路保护方法

2.1.分流电阻检测

图2.1显示了一种常见的电流检测方案，在电源回路的MOSFET 源极串联一个检测电阻 R_{oc} ，当电流流过电阻 R_{oc} 产生一个电压 V_{oc} ，如果检测得到的电压大于逻辑门电路的阈值电压 V_{ocTH} ，则会产生一个短路信号OC Fault，与此同时驱动器关闭OUT输出。

分流电阻检测电流的方案简单明了，可以在任何系统中灵活应用。为了保证检测信号的精度，需要选择高精度电阻以及快速响应的ADC电路；同时为了防止保护信号误触发，需要在比较器前加入适当的滤波电路。这种方案可以采用电阻电容以及比较器的分立元器件方式来实现，也可以选择集成OC保护功能的驱动IC芯片。

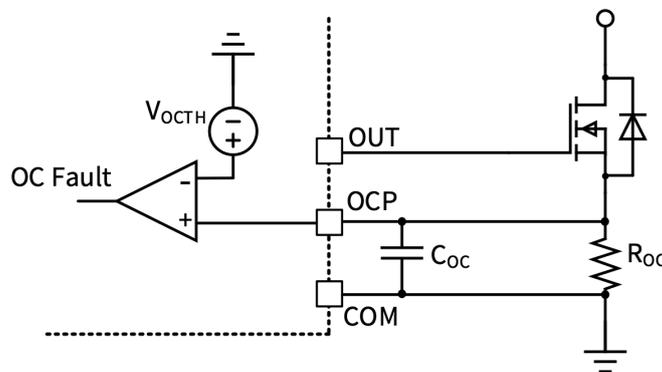


图2.1 过流检测电路1

针对PFC电路，在电流检测电阻的位置上进行调整，图2.2展示了一种负压阈值过流检测的方法。在诸如Boost-PFC的电路结构中，在功率的返回路径中，电流检测电阻 R_{oc} 检测得到的电压为负电压，当检测电压小于设置的阈值电压 V_{ocTH} 时，保护信号触发，驱动器输出引脚输出关断信号。

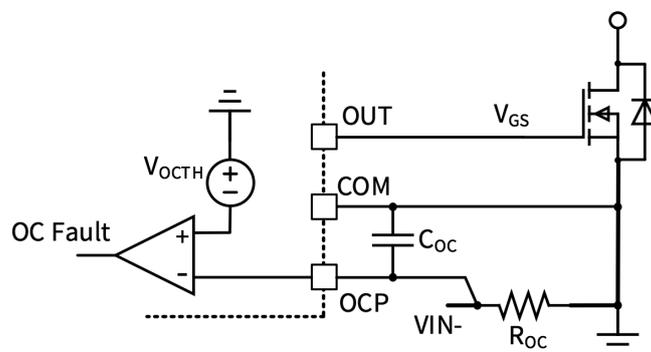


图2.2 过流检测电路2

SiC MOSFET短路特性以及短路保护方法

这种方案的缺点在于电阻带来额外的功率损耗，在大功率系统中，大电流流过检测电阻产生较大的功率损耗；而在小功率系统中，则需要更大的电阻来保持检测信号的准确性，同样也会影响系统效率。同时图2.1所示的方案，检测电阻带来的压降对功率器件的栅-源极电压造成影响，而图2.2的方案存在拓扑的局限性。

2.2. 带电流检测的功率器件

如图2.3所示，存在一种带Sense功能的功率器件，SenseFET集成在功率模块中，与主器件并联。使用高精度的分流电阻测量SenseFET的电流，检测到的电流与器件电流同步。

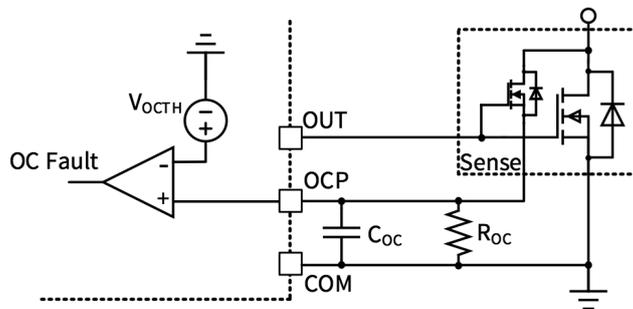


图2.3 SenseFET

集成在功率模块内部的SenseFET，寄生电感小，受到噪声的影响小。但是带SenseFET的电源模块成本较高，增加了系统成本；同时可供选择的器件种类少，可替代性较低。

2.3. 退饱和和检测

2.3.1. DESAT功能介绍

退饱和检测的本质是电压检测，当器件发生短路时，器件漏极和源极两端的电压会异常升高，因此可以通过比较器件正常导通时和短路时的漏源极电压作为短路判断的依据。

当器件开通且正常工作时，SiC器件两端的电压可能在1V左右，芯片内部集成的电流源 I_{DESAT} 通过DESAT引脚，流经电阻 R_{DESAT} 和高压二极管 D_{DESAT} 至MOS的漏极，此时电容 C_{BLANK} 两端的电压为SiC MOS漏源极压降、高压二极管 D_{DESAT} 两端压降和电阻 R_{DESAT} 两端压降之和。

SiC MOSFET短路特性以及短路保护方法

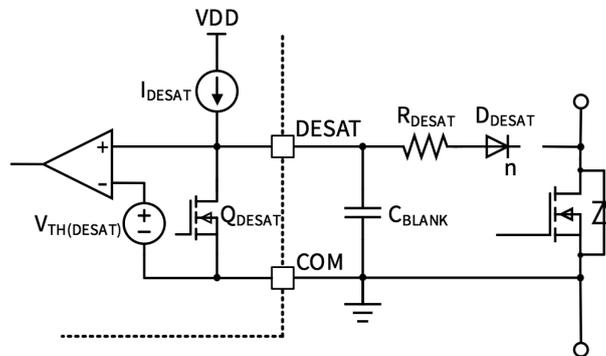


图2.4

当短路发生时，SiC MOS的漏源极电压迅速上升，高压二极管 D_{DESAT} 反偏，内部电流源 I_{DESAT} 通过DESAT引脚给外部电容 C_{BLANK} 充电；当电容 C_{BLANK} 两端电压超过内部比较器的阈值电压 $V_{T(DESAT)}$ ，就会触发短路保护。

2.3.2. 基于SiC应用的DESAT设计考虑

SiC MOS的短路保护在设计时，需要考虑短路检测以及短路关断两方面。其中，短路检测在设计时，需要兼顾响应速度以及抗干扰性能。短路检测响应及时，可以避免功率模块损坏；而良好的抗干扰性能，可以避免误触发。但是响应速度和抗干扰性是矛盾的，需要在设计时取得平衡。短路关断涉及的是检测到短路信号后，OUT如何作用以达到安全关断功率器件的目的。

因此，在选择SiC MOS驱动芯片以及进行DESAT保护电路设计过程中，本文从短路检测以及短路关断的方式两个方面出发，给出下面的建议：

● DESAT保护电压

在DESAT保护电路设计过程中，需要考虑SiC MOS触发DESAT保护的电压阈值 $V_{DS(DESAT)}$ ，这个电压应该高于正常工作下的漏源极电压 V_{DS} 。值得说明的是，驱动芯片内部触发DESAT保护的电压 $V_{TH(DESAT)}$ 不等于 $V_{DS(DESAT)}$ ，需要考虑DESAT保护路径上的 R_{DESAT} 两端电压以及高压二极管 D_{DESAT} 的导通压降，可以按照下面的公式进行计算：

$$V_{DS(DESAT)} = V_{TH(DESAT)} - n \times V_{DESAT} - I_{DESAT} R_{DESAT}$$

SiC MOSFET短路特性以及短路保护方法

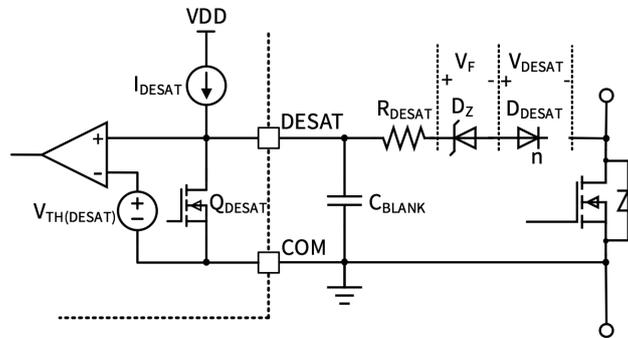


图2.5

SiC MOS的应用中触发DESAT保护的电压阈值 $V_{DS(DESAT)}$ 一般小于同规格下的IGBT。而驱动芯片内部的DESAT电压阈值 $V_{TH(DESAT)}$ 一般固定，例如NSI6611以及NSI6651内部的 $V_{TH(DESAT)}$ 为固定的9V，NSI68515、NSD1015T以及NSD1015MT内部 $V_{TH(DESAT)}$ 为固定的6.5V。为了适应SiC MOS的应用，可以通过调整DESAT保护路径上的电阻 R_{DESAT} 的大小，同时，增加电阻 R_{DESAT} 也可以降低功率级的瞬态干扰。同时，也可以在DESAT保护路径上增加齐纳二极管来减低实际的功率管保护阈值，如图2.5所示。此时电压保护阈值 $V_{DS(DESAT)}$ 可以按照下面的公式进行计算：

$$V_{DS(DESAT)} = V_{TH(DESAT)} - V_F - n \times V_{DESAT} - I_{DESAT} R_{DESAT}$$

● 电容 C_{BLANK}

外加的电容 C_{BLANK} 大小直接影响了DESAT引脚电压到达阈值的时间，同时 C_{BLANK} 的电容大小与芯片内置的电流源 I_{DESAT} 相关，一般可以按照下面的公式进行计算：

$$t_{BLK} = \frac{V_{TH(DESAT)} C_{BLANK}}{I_{DESAT}}$$

减小电容 C_{BLANK} 的大小，可以加快短路检测的反应速度，但是可能导致DESAT误动作。常见的误动作是因高压二极管结电容耦合的位移电流导致，所以在保证一定的电容 C_{BLANK} 大小的情况下，需要选择结电容较小的高压二极管，或者可以通过多个高压二极管串联的形式减小寄生电容。在考虑SiC MOS短路保护的响应时间和避免误动作之间权衡，电容 C_{BLANK} 一般范围在30pF~300pF间。

SiC MOSFET短路特性以及短路保护方法

● 利用OC功能搭建DESAT保护电路

外加的电容 C_{BLANK} 大小直接影响了DESAT引脚电压到达阈值的时间，同时 C_{BLANK} 的电容大小与芯片内置的电流源 I_{DESAT} 相关，一般可以按照下面的公式进行计算：

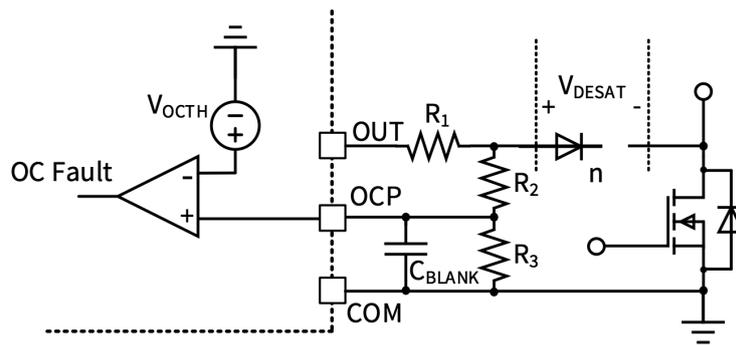


图2.6

OC保护是通过分流电阻两端的压降从而推断功率器件流过的电流大小，因为外加在功率路径中的分流电阻存在功耗问题，保护阈值比较小，一般为0.7V左右。图2.7提供了一种接法，将OC引脚接成了类似DESAT保护的外围电路，并将R1上拉到VDD或者OUT引脚创造充电电源。

使用上述接法时，触发保护的 $V_{DS(DESAT)}$ 的保护阈值以及相应的时间可以按照下面的公式进行计算：

$$V_{DS(DESAT)} = V_{OCTH} \times \frac{R_2 + R_3}{R_3} - n \times V_{DESAT}$$

$$t_{BLK} = -\frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \times R_3 \times C_{BLANK} \times \ln \left(1 - \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3} \times \frac{V_{OCTH}}{VDD} \right)$$

● 短路关断方式

短路故障发生时电流等级很高，如果在检测到短路信号后直接关断OUT信号，过大的di/dt以及功率环路中的寄生电感可能导致过电压，影响SiC MOS的使用寿命甚至造成损坏。针对SiC MOS所在的应用，比较推荐两级关断和软关断的方法进行短路故障的处理，NSI6611、NSI6651以及NSI68515在触发DESAT保护后进入软关断模式，可以很好得应对该问题。

SiC MOSFET短路特性以及短路保护方法

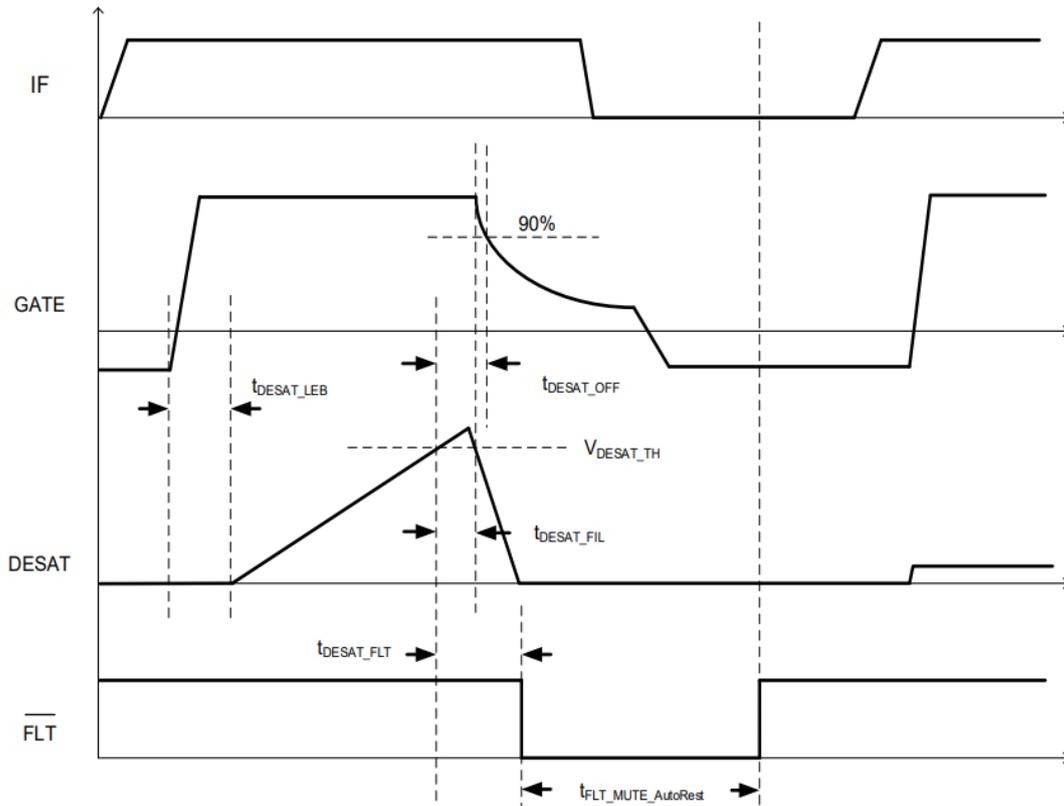


图2.7 时序图 (来自NSI68515数据手册)

SiC MOSFET短路特性以及短路保护方法

3.修订历史

版本	描述	作者	日期
1.0	创建应用笔记	Xiaowen Jiang	2024/9/18

销售联系方式: sales@novosns.com; 获取更多信息: www.novosns.com

重要声明

本文件中提供的信息不作为任何明示或暗示的担保或授权,包括但不限于对信息准确性、完整性,产品适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的陈述或保证。

客户应对其使用纳芯微的产品和应用自行负责,并确保应用的安全性。客户认可并同意:尽管任何应用的相关信息或支持仍可能由纳芯微提供,但将在产品及其产品应用中遵守纳芯微产品相关的适用法律、法规和相关要求。

本文件中提供的资源仅供经过技术培训的开发人员使用。纳芯微保留对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其他更改的权利。纳芯微仅授权客户将此资源用于开发所设计的整合了纳芯微产品的相关应用,不视为纳芯微以明示或暗示的方式授予任何知识产权许可。严禁为任何其他用途使用此资源,或对此资源进行未经授权的复制或展示。如因使用此资源而产生任何索赔、损害、成本、损失和债务等,纳芯微对此不承担任何责任。

有关应用、产品、技术的进一步信息,请与纳芯微电子联系(www.novosns.com)。

苏州纳芯微电子股份有限公司版权所有