

Application Note

TPSI3133 DESAT 如何保护您昂贵的 SiC MOSFET 和 IGBT



Tilden Chen and Akshaya Ramachandran

摘要

在电力电子设计中，保护 SiC MOSFET 和 IGBT 等功率半导体免受过饱和造成的损坏。当这些器件运行超出其预期的工作区域时，过多的功率耗散会导致热应力和故障。

退饱和 (DESAT) 保护电路通过监控半导体上的电压并在过流事件期间将其关闭来提供具有成本效益的保护功能。本文探讨了 DESAT 保护的工作原理、关键电路元件以及如何使用 TPSI3133 隔离式开关驱动器设计 DESAT 电路。

内容

1 为何需要 DESAT 保护.....	2
1.1 关于 DESAT 保护的主要注意事项.....	3
2 关键 DESAT 电路元件.....	3
2.1 电路启动行为.....	3
3 设计示例.....	4
3.1 设计要求.....	4
3.2 阈值公式.....	4
3.3 给定的参数.....	4
3.4 将给定参数代入公式中.....	5
3.5 求解未知数方程.....	5
3.6 选择电阻以满足公式的要求.....	5
3.7 确定消隐电容.....	5
3.8 最终组件值.....	6
3.9 实验室测试.....	6
4 结语.....	6

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 为何需要 DESAT 保护

MOSFET 和 IGBT 等功率半导体在完全饱和状态下可实现理想工作状态：MOSFET 的欧姆区域和 IGBT 的饱和区域。MOSFET 的 V_{DS} 或 IGBT 的 V_{CE} 两端的电压保持低电平，以最大限度地降低功率耗散。但是，当这些器件进入如 图 1-1 所示的过饱和状态时，电流的小幅增加会导致电压大幅增加，从而导致过度功耗和潜在的损坏。

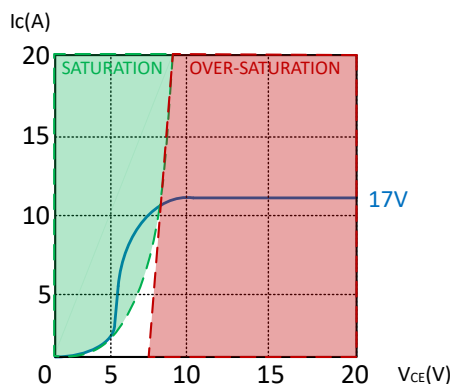


图 1-1. IGBT I-V 曲线示例

一些隔离式开关驱动器包括退饱和 (DESAT) 保护功能，可监控 V_{DS} 或 V_{CE} 并在过流事件期间快速关断半导体。TPSI31xx 是一系列完全集成的隔离式开关驱动器，与外部电源开关结合使用时，可构成完整的隔离式固态继电器。

TPSI3133 (如 图 1-2 所示) 是专门用于 DESAT 的型号，因为它在故障比较器输入端具有内部下拉 MOSFET。内部 MOSFET 通过下拉故障比较器输入并在 EN 变为高电平后继续下拉 100ns 来防止在 IGBT/SiC MOSFET 关断时出现误报，从而使 IGBT/SiC MOSFET 能够完全导通。

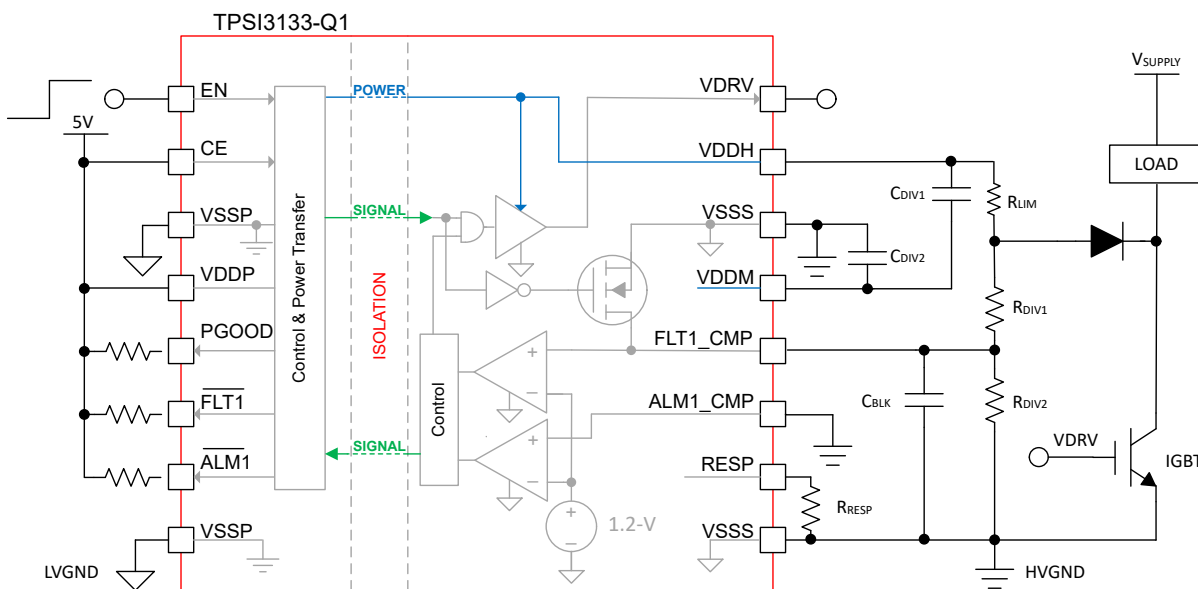


图 1-2. 配置 TPSI3133 的 DESAT

1.1 关于 DESAT 保护的主要注意事项

DESAT 保护电路通常使用 IGBT 进行配置，因为 IGBT 在饱和区的电流 (I_C) 上表现出不同的电压 (V_{CE})，这使得检测更容易，更快速地转换到有源区，并且由于芯片尺寸较大，通常能够处理更大的功率（许多都具有耐短路额定值）。

DESAT 还可以用于 SiC MOSFET。低压 MOSFET 的问题是：由于过流阈值的设置通常远高于正常运行水平以避免误报，因此低压 MOSFET 可能会因电路甚至还未检测到过流事件就因过热而损坏。

通过实施 DESAT 保护，工程师可以确保功率半导体保持在安全的工作范围内。

2 关键 DESAT 电路元件

1. 阻断二极管：在 IGBT/SiC MOSFET 关断时保护电路免受高电压影响。
2. 限流电阻 (R_{LIM}) 限制二极管正向电流。
3. DESAT 阈值检测 (R_{DIV1} , R_{DIV2})：定义了用于检测过饱和的电压阈值。
4. 消隐电容 (C_{BLK})：滤除噪声并防止误触发。虽然消隐电容有助于避免误报，但也可能会在过流事件期间延长 IGBT/SiC MOSFET 上的应力时间。

2.1 电路启动行为

在 EN 为低电平上电时，TPSI3133 接收电力并开始将电力传输到其次级电源轨 (V_{DDM} 和 V_{DDH})。内部 MOSFET 将比较器输入拉低，以避免误触发。一旦 EN 变为高电平，两个电流路径（路径 1 和 2）将竞争以设置比较器输入电压，如图 2-1 所示。由于 IGBT 导通延迟，路径 1 通常比路径 2 快，因此一旦 EN 变为高电平，TPSI3133 就会将比较器输入额外下拉保持 100ns，从而让 IGBT 在检测到故障之前完全导通。添加消隐电容 (C_{BLK}) 可以提供额外的延迟，但必须仔细选择，以尽量减少应力时间。在过载情况下，IGBT 的 V_{CE} 上升，导致 HV 二极管阳极上的电压升高，从而触发故障比较器阈值。一旦 TPSI3133 检测到故障，它就会关闭驱动器，进而关闭 IGBT，从而保护系统。

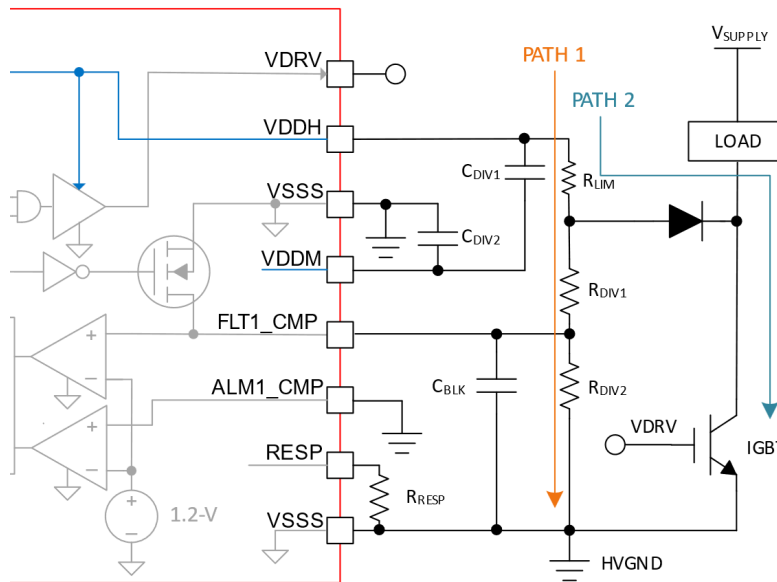


图 2-1. DESAT KVL 路径

3 设计示例

3.1 设计要求

表 3-1 列出了示例 DESAT 设计的要求。

表 3-1. 示例设计要求

参数	值
过流阈值	10A
最大响应时间	10μs

3.2 阈值公式

选择适当的电阻值可确保阻断二极管在 IGBT 导通时变为正向偏置，从而进行适当的电压检测。

1. 检测电压的条件，允许阻断二极管在 IGBT 导通时变为正向偏置：

$$(V_{CE(DESAT)} + V_{F(DIODE)}) < \frac{R_{DIV1} + R_{DIV2}}{R_{DIV2} + R_{DIV1} + R_{LIM}} \times V_{DDH} \quad (1)$$

2. 过流阈值公式，选择所需电压阈值 ($V_{CE(DESAT)}$) 以使比较器跳闸 (V_{REF+})：

$$V_{REF+} < \frac{R_{DIV2}}{R_{DIV2} + R_{DIV1}} \times (V_{CE(DESAT)} + V_{F(DIODE)}) \quad (2)$$

使用之前的 IGBT I-V 曲线示例， $V_{CE} = 7.5V$ 时， $I_C = 10A$ 。使用此过流阈值求解电阻。请记住：I-V 曲线是典型值，各器件可能会各有变化。

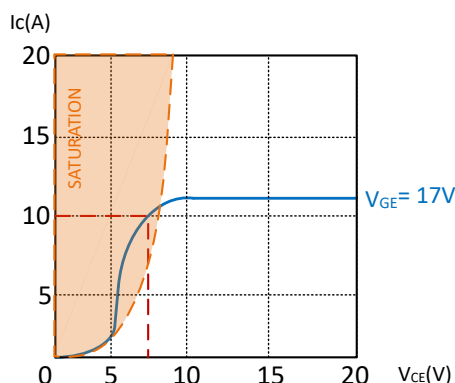


图 3-1. DESAT 选择 V_{CE} 阈值

3.3 给定的参数

选择 R_{LIM} 以限制二极管正向电流。根据图 3-2 中的高压二极管 I-V 曲线示例，选择 $54.9k\Omega$ 会将 V_F 限制为 $0.7V$ 。请注意，TPSI3100 系列可提供 $25mW$ 功率来为辅助电路供电， $R_{LIM} = 54.9k\Omega$ 消耗高达 $5.26mW$ 。

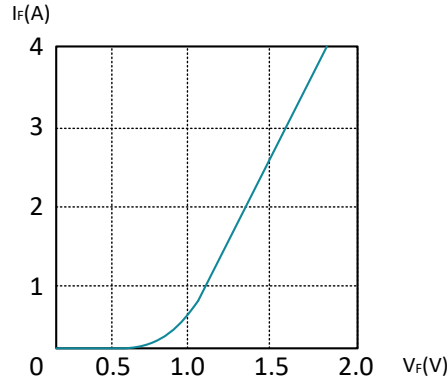


图 3-2. HV 二极管 I-V 曲线示例

表 3-2. 给定设计参数值

参数	值
V _{CE (DESAT)}	7.5V
V _{F (DIODE)}	0.7V
V _{REF+}	1.23V
R _{LIM}	54.9k Ω

3.4 将给定参数代入公式中

- $(7.5V + 0.7V) \times 1.2(20\%margin) < \frac{R_{DIV1} + R_{DIV2}}{R_{DIV2} + R_{DIV1} + 54.9e3} \times 17V$
- $\frac{R_{DIV2}}{R_{DIV2} + R_{DIV1}} \times (7.5V + 0.7V) > 1.23V \times 1.2(20\%margin)$

3.5 求解未知数方程

- $R_{DIV1} > -\frac{41}{50}$
- $R_{DIV2} > \frac{1}{73}(5325300 - 73 \times R_{DIV1})$

3.6 选择电阻以满足公式的要求

表 3-3. 所选择的设计电阻

参数	值
R _{DIV1}	23.9k Ω
R _{DIV2}	11.5k Ω

3.7 确定消隐电容

从通用 RC 公式开始，根据 10μs 最大延迟要求选择 C_{BLK} 值。如果我们使用 R_{RESP} < 10k Ω，则传播延迟时间可能长达 460ns，这一点需要加以考虑。使用 Thevenin/Norton 等效电路来确定 C_{BLK} 检测到的等效电阻。

$$V_C = V_S \times \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (3)$$

$$V_{REF+} < VDDH \times \left(1 - e^{-\frac{(t_{MAXDELAY} - t_{RESP}) \times (R_{LIM} + R_{DIV1} + R_{DIV2})}{(R_{LIM} + R_{DIV1}) \times R_{DIV2} \times C_{BLK}}}\right) \quad (4)$$

$$1.23 < 17 \times \left(1 - e^{-\frac{(10\mu - 460n) \times (54.9e3 + 23.9e3 + 11.5e3)}{(54.9e3 + 23.9e3) \times 11.5e3 \times C_{BLK}}}\right) \quad (5)$$

$$0 < C_{BLK} < 12.66nF$$

(6)

3.8 最终组件值

使用这些选择的值，设计可防止过饱和并满足初始要求指定的所需延迟时间。

表 3-4. 最终设计元件值

元件	值
R_{LIM}	54.9k Ω
R_{DIV1}	23.9k Ω
R_{DIV2}	11.5k Ω
C_{BLK}	<12.66nF

3.9 实验室测试

下面的波形显示了 DESAT 电路的实际应用，确认其能够检测过流条件并在发生损坏之前将 IGBT 关断。

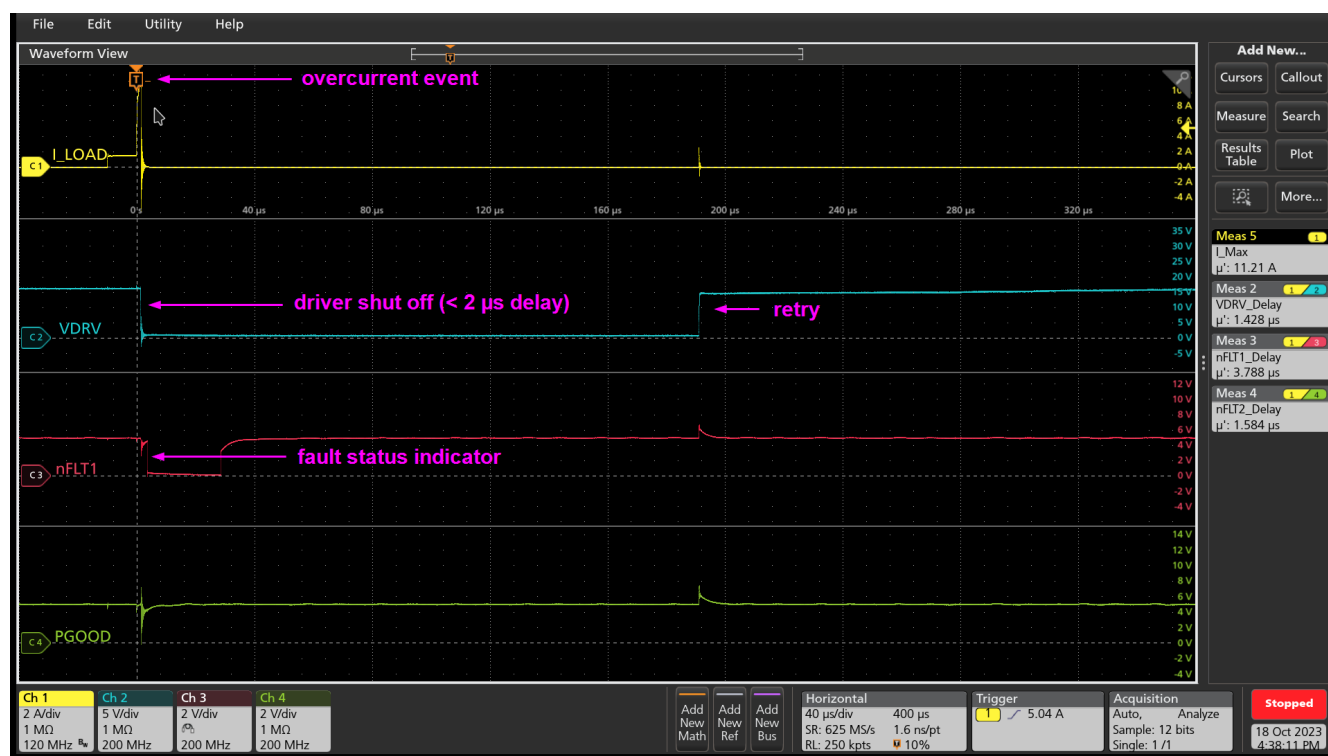


图 3-3. DESAT 电路波形

4 结语

正确实现 DESAT 保护可防止破坏性过饱和，从而提高 SiC MOSFET 和 IGBT 的可靠性并延长其使用寿命。通过仔细选择具有 DESAT 保护功能的隔离式栅极驱动器（如 TPSI3133）并计算元件值，设计人员可以优化速度，同时防止误报。本文举例说明了如何选择满足特定 DESAT 设计要求的元件。工程师可以将 DESAT 保护用于功率半导体以防过流事件，从而确保高功率应用的效率和长期性能。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、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暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司