

Application Brief

提高栅极驱动器性能：米勒钳位与双极输出的对比



Vikhyat Desai

引言

随着电力电子产品朝着更高的效率和密度发展，稳健的栅极驱动器设计变得至关重要，尤其是对于高功率应用中的 SiC MOSFET 和 IGBT。本手册将传统米勒钳位技术与双极输出栅极驱动器进行了比较，重点介绍双极驱动如何提高抗噪性、防止误导通以及提高开关性能。通过比较分析和 EV 牵引逆变器、光伏逆变器和电机驱动器等实际应用，本应用手册讨论了如何在现代高性能电源系统中采用双极性栅极驱动器。

碳化硅 (SiC) 具有 3.26eV 的宽带隙，在高功率、高频和高温应用中比传统硅 (Si) 具有显著的优势。由于具有碳化硅的击穿电压、较低的导通电阻和更好的导热性，因此可在高达 10kV 的电压和高达 200°C 的温度下运行，并且可以降低开关损耗和传导损耗。

虽然 Si MOSFET 和 IGBT 均广泛用于电源系统，但它们在性能上有所不同。IGBT 能够以较低的导通损耗处理较高的电流，而 MOSFET 可提供更快的开关速度，但电流容量会受到限制。SiC MOSFET 将 MOSFET 的高频优势与 IGBT 的高电压能力相结合，可实现更高的效率、更高的功率密度和更低的热应力。这些特性使 SiC 成为电动汽车、可再生能源系统和高效电源等应用的理想选择。

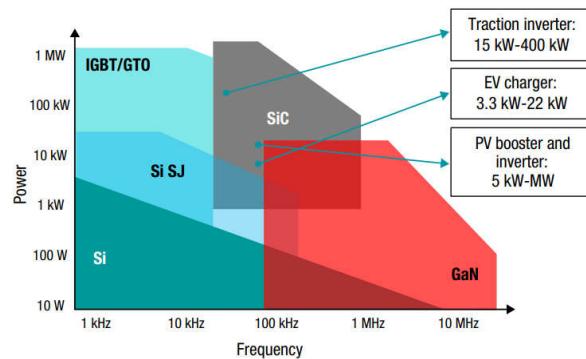


图 1. 基于功率和频率水平的功率半导体器件应用

终端设备

设备	开关管	等级
EV 牵引逆变器	SiC	400V 至 1200V
车载充电器 (OBC)	SiC	400V 至 800V
EV 中的直流/直流转换器	SiC	400V 至 800V
直流快速充电站	SiC	最高 1500V
光伏逆变器	SiC / IGBT	600V 至 1500V
数据中心电源 (PFC)	SiC	380V 至 480V
工业电机驱动	IGBT	600V 至 1700V
焊接机	IGBT	600V 至 1200V
不间断电源	IGBT	600V 至 1700V
HVAC 电源	IGBT	600V 至 1200V
铁路牵引和机车驱动	SiC/IGBT	1200V 至 3300V
航空航天电源系统	SiC	270V 至 1000V+
升降机驱动和起重机	IGBT	600V 至 1700V

dV/dt 诱发的导通

在逆变器、电源转换器和电机驱动器等大功率应用中，IGBT 和 SiC MOSFET 通常会发生快速开关转换，从而产生大电压 (dV/dt) 和电流 (di/dt) 瞬态。虽然这种快速开关操作可以提高效率，但也会与电路中的寄生元件相互作用并导致意外的器件行为。一个显著的问题是 **dV/dt 诱发的导通**，其中漏源电压 (V_{ds}) 的快速增加会导致位移电流流过器件的米勒电容 (C_{gd} 或 C_{ge})。

这种米勒电流会在栅极电阻上产生压降，如果产生的栅源电压 (V_{gs}) 超过器件的阈值电压 (V_{th})，则可能会意外打开开关。在半桥配置中，这可能会导致 **击穿**，即上下器件同时导通，从而导致过大的电流和热应力。为了防止此类故障，栅极驱动器通常采用负栅极偏置或集成式米勒钳位电路来抑制寄生导通，并验证在高 dV/dt 条件下的可靠运行。

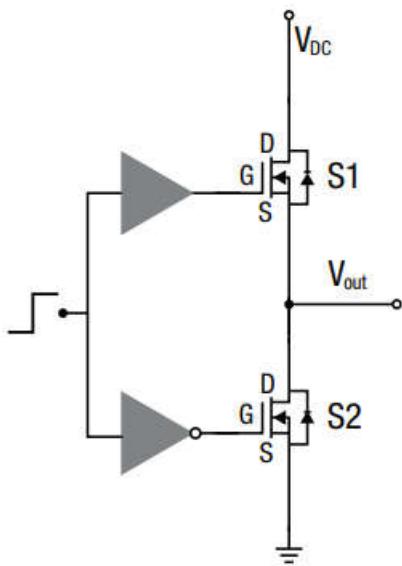


图 2. MOSFET 半桥

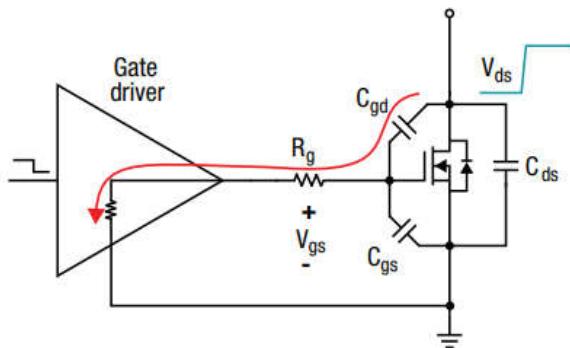


图 3. S2 的米勒电流路径

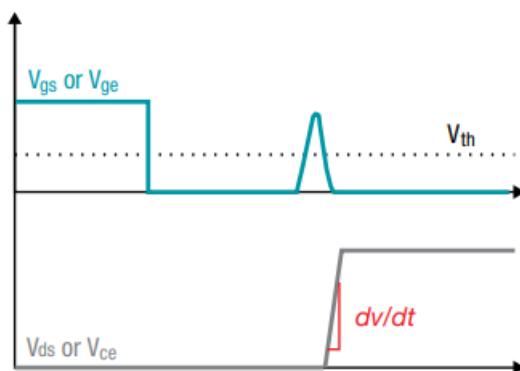


图 4. 米勒电流对 S2 栅极电压的影响

米勒电流

在高速电源开关应用中，器件上的电压瞬态(dV/dt)可以通过寄生米勒电容(C_{gd})耦合，产生栅极电流，从而意外导通器件。 C_{gd} 是功率半导体的固有物理属性，无法修改，因此一种常见的缓解方法是通过增大相应FET的栅极电阻(R_g)来降低 dV/dt 。不过，这种方法会减慢开关转换速度并增加开关损耗，因此需要在抗噪性和效率之间进行权衡。可采用米勒钳位来克服该限制。米勒钳位是靠近栅极的低阻抗开关，可在关断期间提供直接接地路径或负电压轨。这可以防止栅极电压由于 dV/dt 诱发的电流而上升。米勒钳位集成到栅极驱动器架构中可实现对栅极的关断电阻的独立控制，而不会影响电路的米勒抗扰度。米勒钳位的有效性主要取决于决定阻抗和下拉电流能力的放置方式。高阻抗或下拉电流不足会导致钳位失效，从而无法抑制错误的导通事件。因此，在现代栅极驱动器架构中，精心设计米勒钳位电路对于保持抗噪性和开关效率至关重要。

内部与外部米勒钳位的对比

米勒钳位的有效性在很大程度上取决于靠近电源开关的程度，因为钳位必须提供比栅极驱动器更低阻抗的米勒电流接地路径。如果钳位远离器件，则钳位连接中的寄生串联电阻(R_p)和电感(L_p)会大大降低性能。内部米勒钳位(集成在栅极驱动器IC内)可更大限度地减少元件数量，但如果IC封装和电路板布局布线将米勒钳位放置在与开关保持距离的位置，则可能会受到这些寄生效应的影响。相反，虽然外部实现的米勒钳位需要额外的元件，但可以直接放置在电源开关附近，从而更大限度地减少 R_p 和 L_p ，并确保对 dV/dt 诱发栅极瞬态的可靠抑制。对于表现高 dV/dt 的应用，最好使用外部钳位来验证防止误导通所需的低阻抗电流返回路径。

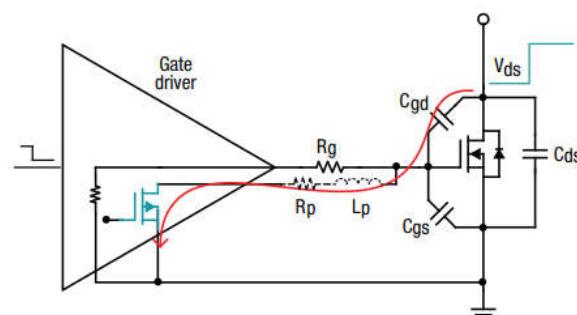


图 5. 内部米勒钳位

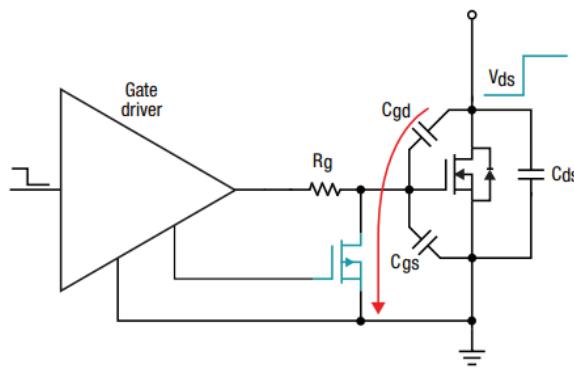


图 6. 外部米勒钳位

双极输出

栅极驱动器在控制 MOSFET 和 IGBT 等功率半导体的开关行为方面发挥着至关重要的作用。传统栅极驱动器通常使用单极输出，将栅极从 $0V$ 驱动至正电压（例如 $15V$ ）。然而，在高功率和高速开关环境中，由于寄生效应引起不必要的导通事件，这种方法可能会导致可靠性问题。能够提供正负栅极电压的双极栅极驱动器可减少误导通和误关断难题。

双极栅极驱动器在导通期间施加正电压（例如 $15V$ ），在关断期间施加相对于开关器件源极或发射极的负电压（例如 $-5V$ ）。这种双轨方法可提高对噪声和 dV/dt 诱发的误导通的抗扰度，尤其是在半桥和全桥配置中，在这种配置中，高侧开关的转换可以通过低侧器件的米勒电容 (C_{gd}) 产生感应电流。在单极方案中，栅极只能被拉至 $0V$ ，而 dV/dt 耦合产生的任何额外电压都可以将栅极推至阈值电压 (V_{th}) 以上，从而无意中导通器件。相比之下，负栅极电压会使有效导通阈值进一步转移，从而显著提高噪声稳健性。

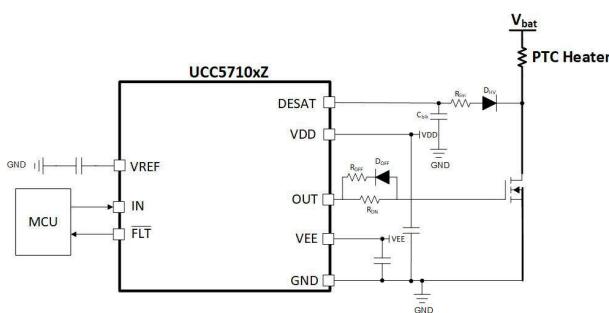


图 7. 显示双极输出的 UCC5710xC 应用图

UCC510xB/Z 支持外部负电压生成，使设计人员可通过提供专用负电压引脚 (VEE) 来实现双极栅极驱动。该功能可在关断期间灵活调整负偏置，这对于增强抗噪性能和防止米勒电容引起的不必要的导通事件至关重要。通过使用外部负电压源，该驱动器可以满足不同电源开关应用中的各种栅极驱动要求。

双极栅极驱动的优势体现在多个方面。双极栅极驱动通过主动反对栅极反弹和寄生导通来提供 dV/dt 抗扰度，通过将栅极牢固地拉至地电位以下验证更安全、更可靠的关断，并且可以降低互补开关配置中的击穿风险。此外，负电压会加速栅极电荷的去除，有助于加快开关关断速度。对于 IGBT 器件，双极栅极驱动还有助于管理关断事件期间的尾电流行为和 dV/dt ，从而提高整体开关性能并降低能量损耗。

负电压偏置可用于防止尖峰电压达到导通阈值，确保 SiC MOSFET 保持关断状态。下图向我们展示了工作原理。

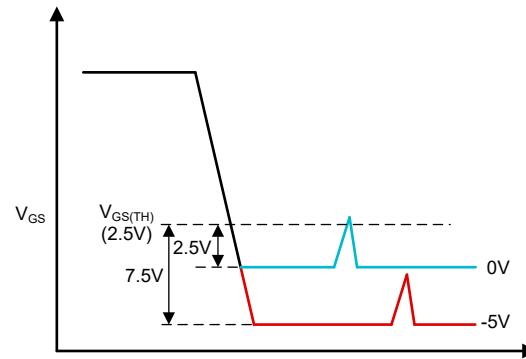


图 8. 不同关断电平的比较

双极输出和米勒钳位之间的差异

方面	双极栅极驱动	米勒钳位
基本操作	在关断期间向栅极施加 -ve 电压 （例如 $-5V$ ）。	在关断期间使用内部低电阻 MOSFET 将栅极钳位到源极（ $0V$ ）。
保护级别	负偏置可提高抗扰度。	中等抗扰度，取决于钳位强度。
电压电平	需要 -ve 电源轨 。	使用单极 ($0V/+15V$) 电源。
复杂性和成本	更复杂，因为采用双电源轨。	更简单，通常集成在栅极驱动器中。
用例	恶劣的开关环境、快速 dV/dt 电路、高压系统。	成本敏感型通用设计。

总之，双极栅极驱动技术在现代高速电力电子系统中至关重要，可提供增强的控制、可靠性并防止寄生引起的开关异常（在快速开关和高压环境中常见）。

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

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出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月