

Application Brief

進階閘極驅動器性能：米勒箝位與雙極輸出



Vikhyat Desai

簡介

隨著電力電子朝更高效率和密度發展，穩健的閘極驅動器設計也變得不可或缺，特別是高功率應用中的 SiC MOSFET 和 IGBT。本說明將傳統米勒箝位技術與雙極輸出閘極驅動器進行比較，強調雙極驅動器如何提升雜訊抗擾度、防止誤開啟，及強化切換性能。透過比較分析與 EV 牽引變流器、太陽能逆變器和馬達驅動等實際應用，本應用說明將探討現代高性能電源系統中雙極閘極驅動器的應用。

碳化矽 (SiC) 的寬能隙為 3.26eV，相較於傳統矽 (Si)，在高功率、高頻率和高溫應用中可提供顯著優勢。碳化矽的崩潰電壓、較低的導通電阻和更佳的導熱性，可在高達 10kV 的電壓和高達 200°C 的溫度下運作，並降低切換與傳導損耗。

雖然 Si MOSFET 和 IGBT 廣泛用於電源系統，但其在性能上有所不同。IGBT 能處理較高的電流和較低的導通損耗，而 MOSFET 提供更快的切換速度，但電流容量有限。SiC MOSFET 結合 MOSFET 的高頻優勢與 IGBT 的高電壓功能，進而提高效率、提高功率密度以及降低熱應力。這些特性讓 SiC 成為電動車、再生能源系統和高效率電源供應器等應用的選擇。

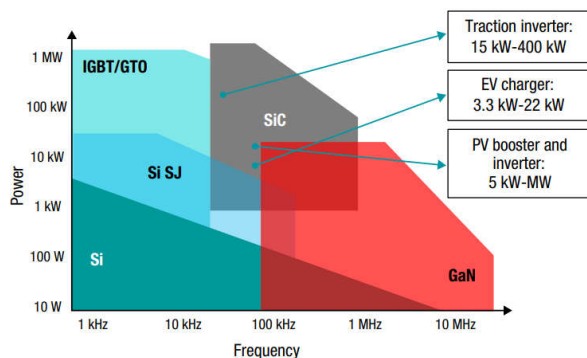


图 1. 基於功率和頻率級別的功率半導體裝置應用

終端設備

設備	電源開關	等級
EV 牽引變流器	SiC	400V - 1200V
板載充電器 (OBC)	SiC	400V - 800V
EV 的 DC-DC 轉換器	SiC	400V - 800V
快速 DC 充電站	SiC	最高 1500V
太陽能逆變器	SiC / IGBT	600V - 1500V
數據中心電源供應器 (PFC)	SiC	380V - 480V
工業馬達驅動	IGBT	600V - 1700V
熔接機	IGBT	600V - 1200V
不斷電系統	IGBT	600V - 1700V
HVAC 電源供應器	IGBT	600V - 1200V
軌道牽引和機車驅動	SiC/IGBT	1200V - 3300V
航太電源系統	SiC	270V - 1,000V+
電梯驅動和起重機	IGBT	600V - 1700V

dV/dt 誘導的開啟

在逆變器、電源轉換器和馬達驅動等高功率應用中，IGBT 和 SiC MOSFET 通常會暴露在快速切換轉換下，以產生大電壓 (dV/dt) 和電流 (di/dt) 瞬態。雖然這種快速切換可提升效率，但快速切換可能會與電路中的寄生元件互動，進而導致意外的裝置行為。一個值得注意的問題是 **dV/dt 誘導的開啟**，其中汲極至源極電壓 (V_{ds}) 的快速增加會導致位移電流流經裝置的米勒電容 (C_{gd} 或 C_{ge})。

此米勒電流會在閘極電阻中產生壓降，如果產生的閘極源極電壓 (V_{gs}) 超過裝置的閾值電壓 (V_{th})，它可能會無意地開啟開關。在半橋配置中，這可能會導致**擊穿電流**，上面和下部裝置同時傳導，進而造成過大的電流和熱應力。為了防止這類故障，閘極驅動器通常採用負閘極偏壓或整合式米勒箝位電路來抑制寄生開啟，並在高 dV/dt 條件下驗證運作是否可靠。

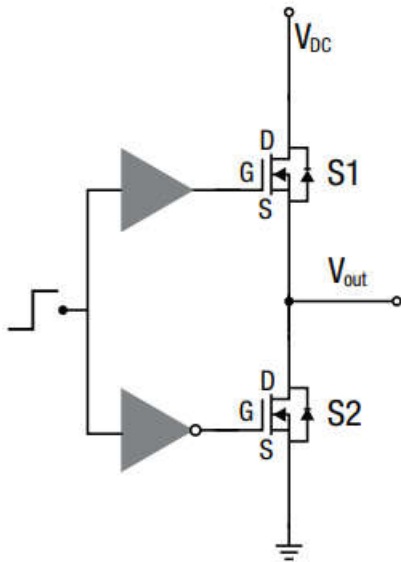


图 2. MOSFET 半橋

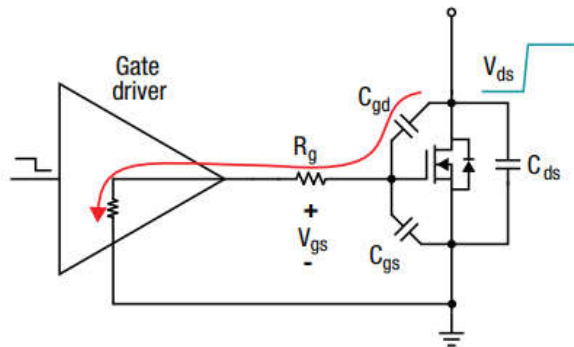


图 3. S2 的米勒電流路徑

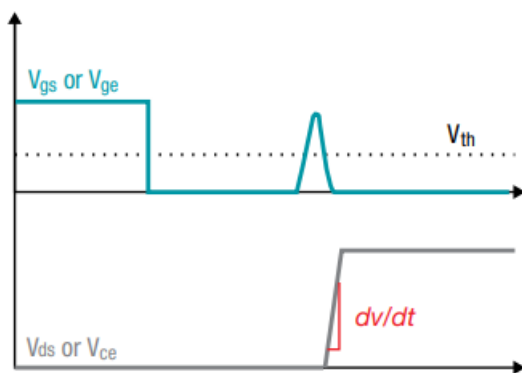


图 4. 米勒電流對 S2 閘極電壓的影響

米勒電流

在高速電源切換應用中，裝置間的電壓暫態 (dV/dt) 可能會透過寄生米勒電容 (C_{gd}) 耦合，進而產生閘極電流，可能意外開啟裝置。由於 C_{gd} 是功率半導體的固有物理屬性，且無法修改，因此常見的緩解方法是透過增加對應 FET 的閘極電阻 (R_g) 來減少 dV/dt 。然而，此方法會減慢切換轉換並增加切換損耗，因此在雜訊抗擾度與效率之間需有所取捨。為了克服此限制，使用了米勒箝位。米勒箝位是置於閘極附近的低阻抗開關，可在關閉期間提供通往接地的直接路徑或負電壓軌。這可防止閘極電壓因 dV/dt 誘發的電流而上升。將米勒箝位整合在閘極驅動器架構中，即可獨立控制閘極的關閉電阻，且無需犧牲電路的米勒抗擾度。米勒箝位的有效性主要取決於決定阻抗和下拉電流能力的位置。高阻抗或下拉電流不足可能會使箝位無效，無法抑制誤啟事件。因此，精心設計米勒箝位電路，對於維持現代閘極驅動器架構中的雜訊抗擾度和切換效率至關重要。

內部與外部米勒箝位

米勒箝位的有效性高度取決於與電源開關的距離，因為此箝位必須為米勒電流提供比閘極驅動器更低阻抗的接地路徑。如果箝位遠離裝置，箝位連接中的寄生串聯電阻 (R_p) 和電感 (L_p) 可能會顯著降低性能。內部米勒箝位（整合在閘極驅動器 IC 中）可將元件數量降到最低，但若 IC 封裝和電路板佈局將米勒箝位置於與開關距離的一定距離，則可能會受到這些寄生效應影響。相反，外部實作的米勒箝位雖然需要額外元件，但可放置在電源開關附近，進而最小化 R_p 和 L_p ，並確保穩固抑制 dV/dt 誘發的閘極瞬態。對於顯示高 dV/dt 的應用，建議使用外部箝位來驗證所需的低阻抗電流傳回路徑，以防止誤開啟。

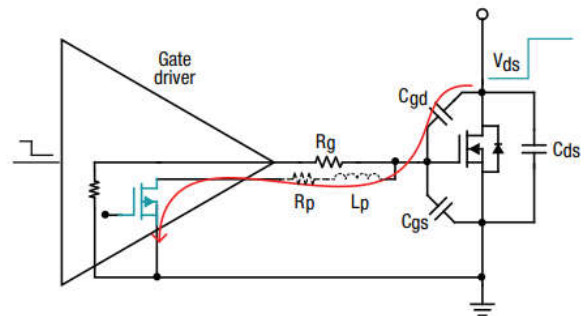


图 5. 內部米勒箝位

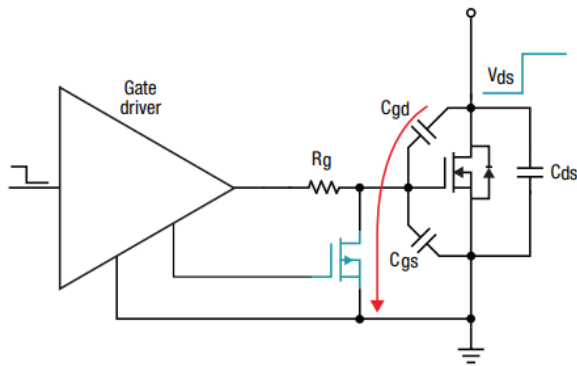


图 6. 外部米勒箝位

雙極輸出

閘極驅動器在控制 MOSFET 和 IGBT 等功率半導體切換行為方面，發揮著重要作用。傳統閘極驅動器通常使用單極輸出，將閘極從 0V 驅動至正電壓（例如 15V）。然而在高功率與高速切換環境中，此方法可能會因寄生效應所造成的不必要之開啟事件而導致可靠性問題。可同時提供正與負閘極電壓的雙極閘極驅動器，可減少誤開啟和誤關閉挑戰。

雙極閘極驅動會在開啟期間施加正電壓（例如 15V），關閉期間則會針對切換裝置的來源或發射器施加負電壓（例如 -5V）。這種雙軌方法可增強對雜訊和 dV/dt 造成之誤開啟的抗擾度，特別是在半橋和全橋配置中，其中高壓側開關的轉換可透過低壓側裝置的米勒電容 (C_{gd}) 誘發電流。在單極方案中，閘極只能被拉至 0V，任何來自 dV/dt 耦合的額外電壓都會將閘極推至高於閾值電壓 (V_{th})，意外開啟裝置。相較之下，負閘極電壓會使有效開啟閾值進一步遠離當前的閘極電壓，可大幅提升雜訊穩固性。

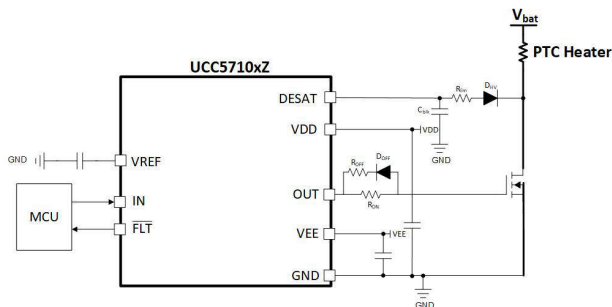


图 7. 顯示雙極輸出的 UCC5710xC 應用圖

UCC510xB/Z 支援外部負電壓產生，讓設計人員能夠透過提供專用負電壓針腳 (VEE) 來實作雙極閘極驅動器。此功能可在關閉期間靈活調整負偏壓，這對於強化雜訊抗擾度和防止米勒電容所造成不必要的開啟事件至關重要。透過使用外部負電壓來源，驅動器可在不同電源切換應用中適應各種閘極驅動需求。

雙極閘極驅動的優點有多方面。雙極閘極驅動可透過主動防止閘極反彈和寄生開啟來提供 dV/dt 抗擾度，並將閘極穩固地拉至接地電位以下，以驗證關閉是否更安全可靠，並降低互補開關配置中的擊穿風險。此外，負電壓可加快移除閘極電荷，協助更快速地關閉開關。對於 IGBT 裝置，雙極閘極驅動也有助於在關閉事件期間管理尾電流行為和 dV/dt，進而提升整體切換性能並減少能量損耗。

負偏壓電壓可用於防止電壓突波達到開啟閾值，確保 SiC MOSFET 保持關閉。下圖展示了此操作的工作方式。

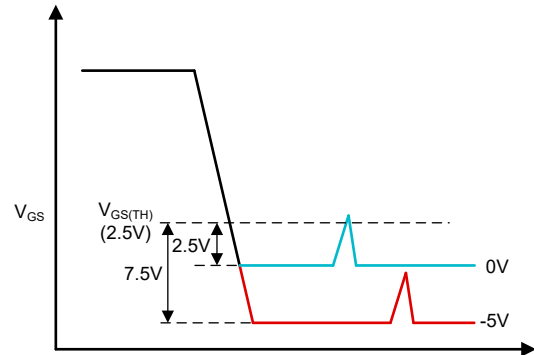


图 8. 不同關閉位準的比較

雙極輸出與米勒箝位之間的差異

項目	雙極閘極驅動器	米勒箝位
基本操作	在關閉期間對閘極施加負電壓（例如 -5V）。	在關閉期間，使用內部低電阻 MOSFET 將閘極箝制至源極 (0V)。
防護等級	因負偏壓而具備更高的抗擾性。	中抗擾性，取決於箝位強度。
電壓電平	需要負供應軌。	可與單極 (0V/+15V) 電源搭配使用。
複雜性和成本	因雙軌而更複雜。	更簡單，常整合在閘極驅動器中。
使用案例	嚴苛的切換環境、快速 dV/dt 電路、高電壓系統。	通用且成本敏感的設計。

總而言之，雙極閘極驅動技術在現代高速電源電子系統中十分重要，可提供強化控制、可靠性，並可防護快速切換與高電壓環境中常見的寄生誘發切換異常。

註冊商標

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要聲明與免責聲明

TI 均以「原樣」提供技術性及可靠性數據（包括數據表）、設計資源（包括參考設計）、應用或其他設計建議、網絡工具、安全訊息和其他資源，不保證其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的擔保，包括但不限於對適銷性、適合某特定用途或不侵犯任何第三方知識產權的暗示擔保。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您將對以下行為獨自承擔全部責任：(1) 針對您的應用選擇合適的 TI 產品；(2) 設計、驗證並測試您的應用；(3) 確保您的應用滿足相應標準以及任何其他安全、安保或其他要求。

所述資源如有變更，恕不另行通知。TI 對您使用所述資源的授權僅限於開發資源所涉及 TI 產品的相關應用。除此之外不得複製或展示所述資源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知識產權授權許可。如因使用所述資源而產生任何索賠、賠償、成本、損失及債務等，TI 對此概不負責，並且您須賠償由此對 TI 及其代表造成的損害。

TI 的產品均受 [TI 的銷售條款](#) 或 [ti.com](#) 上其他適用條款，或連同這類 TI 產品提供之適用條款所約束。TI 提供所述資源並不擴展或以其他方式更改 TI 針對 TI 產品所發布的可適用的擔保範圍或擔保免責聲明。

TI 不接受您可能提出的任何附加或不同條款。

郵寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](#) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025