

Application Brief

ゲートドライバの性能向上:ミラー クランプとバイポーラ出力の比較



Vikhyat Desai

はじめに

パワー エレクトロニクスが高効率および高密度へと進化する中、堅牢なゲートドライバ設計は不可欠となり、特に高電力アプリケーションにおける SiC MOSFET と IGBT でその重要性が増しています。本ノートでは、従来のミラークランプ技術とバイポーラ出力ゲートドライバを比較し、バイポーラドライブがノイズ耐性の向上、誤動作オンの防止、スイッチング性能の強化にどのように寄与するかを示します。EV トラクション インバータ、ソーラインバータ、モータードライブなどの実アプリケーションと比較分析を通じて、本アプリケーション ノートは最新の高性能電力システムにおけるバイポーラ ゲートドライバ採用について検討します。

シリコン カーバイド (SiC) は、3.26eV の広いバンドギャップを有し、高電力、高周波数、高温アプリケーションにおいて従来のシリコン (Si) に対して大きな利点を提供します。シリコン カーバイドの高い耐圧、低オン抵抗、優れた熱伝導性により、10kV までの電圧および 200°C までの温度で動作可能となり、スイッチング損失と導通損失を低減します。

Si MOSFET と IGBT は電力システムで広く使用されていますが、その性能には違いがあります。IGBT は高電流を低い導通損失で扱える一方、MOSFET は高速スイッチングが可能ですが電流容量に制限があります。SiC MOSFET は MOSFET の高周波特性と IGBT の高耐的能力を兼ね備え、より高い効率、より大きな電力密度、低い熱ストレスを実現します。これらの特性により、SiC は電気自動車、再生可能エネルギー システム、高効率電源などの用途に適した選択肢となっています。

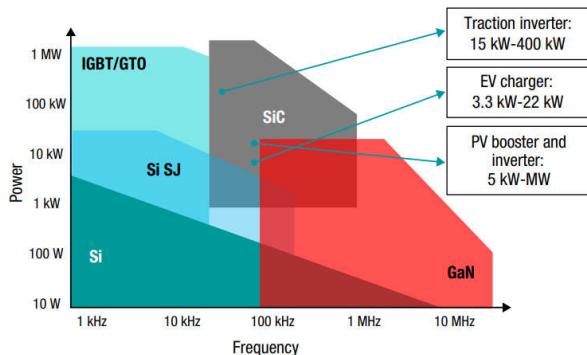


図 1. 電力および周波数レベルに基づくパワー半導体デバイスのアプリケーション

最終製品

機器	パワー スイッチ	定格
EV トラクション インバータ	SiC	400V~1200V
オンボード充電器 (OBC)	SiC	400V~800V
EV 内の DC-DC コンバータ	SiC	400V~800V
急速 DC 充電ステーション	SiC	最大 1500V
ソーラー インバータ	SiC/IGBT	600V~1500V
データ センター 電源 (PFC)	SiC	380V~480V
産業用モータードライブ	IGBT	600V~1700V
溶接機	IGBT	600V~1200V
無停電電源	IGBT	600V~1700V
HVAC 用電源	IGBT	600V~1200V
レールトラクションおよび機関車ドライブ	SiC/IGBT	1200V~3300V
航空宇宙向け電力システム	SiC	270V~1000V+
エレベータードライブおよびクレーン	IGBT	600V~1700V

dV/dt 起因のターンオン

インバータ、パワー コンバータ、モータードライブといった高電力アプリケーションでは、IGBT と SiC MOSFET は、電圧 (dV/dt) および電流 (di/dt) の大きな過渡変化を生じる高速スイッチング遷移にさらされるのが一般的です。このような高速スイッチングは効率を向上させる一方で、回路内の寄生要素と相互作用し、意図しないデバイス動作を引き起こす可能性があります。代表的な問題として **dV/dt 起因のターンオン**があり、トレンイン ソース間電圧 (V_{ds}) の急激な上昇によって、デバイスのミラー キャパシタス (C_{gd} または C_{ge}) に変位電流が流れます。

このミラー電流はゲート抵抗に電圧降下を生じさせ、結果として得られるゲート ソース間電圧 (V_{gs}) がデバイスのレッショルド電圧 (V_{th}) を超えると、スイッチが意図せずオンになる可能性があります。ハーフ ブリッジ構成では、これによりシャートスルーリングにつながり、上側と下側のデバイ

スが同時に導通して過電流と熱ストレスを生じさせることができます。このような故障を防ぐため、ゲートドライバは負のゲートバイアスや統合型ミラー クランプ回路を用いて寄生ターンオンを抑制し、高 dV/dt 条件下での信頼性動作を確保します。

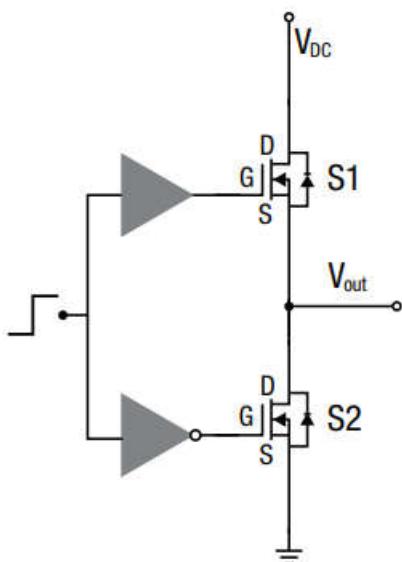


図 2. MOSFET ハーフブリッジ

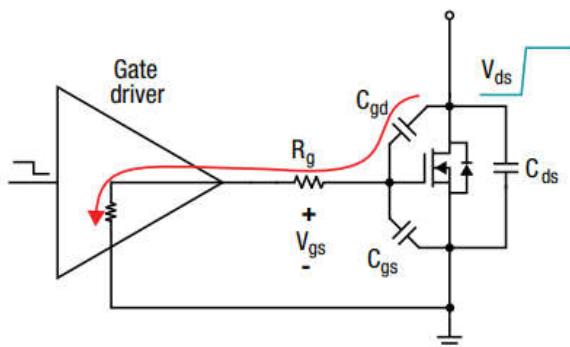


図 3. S2 のミラー電流パス

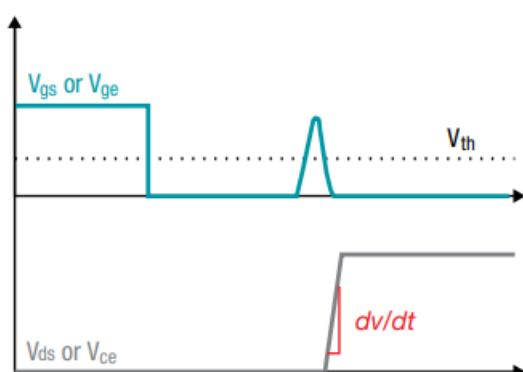


図 4. S2 のゲート電圧に対するミラー電流の影響

ミラー電流

高速パワー スイッチング アプリケーションでは、デバイス両端の電圧過渡 (dV/dt) が寄生ミラー キャパシタンス (C_{gd}) を介して結合し、デバイスを意図せずオンにするゲート電流を生成することがあります。 C_{gd} はパワー半導体の本質的な物理特性であり変更できないため、一般的な緩和手法として、該当 FET のゲート抵抗 (R_g) を増加させて dV/dt を低減します。しかし、この方法はスイッチング遷移を遅くし、スイッチング損失を増大させるため、ノイズ耐性と効率の間にトレードオフが生じます。この制約を克服するために、ミラー クランプが採用されます。ミラー クランプはゲート近傍に配置される低インピーダンスのスイッチで、ターンオフ時にグランドまたは負電圧レールへの直接パスを提供します。これにより、 dV/dt によって誘導される電流でゲート電圧が上昇することを防ぎます。ゲートドライバーアーキテクチャにミラー クランプを統合することで、回路のミラー イミュニティを損なうことなく、ゲートのターンオフ抵抗を独立して制御できます。ミラー クランプの有効性は主に配置位置に依存し、それがインピーダンスとプルダウン電流能力を決定します。インピーダンスが高すぎたりプルダウン電流が不足したりすると、クランプが効果を発揮できず、誤ターンオンを抑制できません。そのため、最新のゲートドライバーアーキテクチャにおいてノイズ耐性とスイッチング効率を両立するには、ミラー クランプ回路の慎重な設計が不可欠です。

内部ミラー クランプと外部ミラー クランプの比較

ミラー クランプの有効性はパワー スイッチとの近接性に大きく依存し、クランプはゲートドライバよりも低インピーダンスのグランド パスをミラー電流に提供しなければなりません。クランプがデバイスから離れている場合、クランプ接続部の寄生直列抵抗 (R_p) と寄生インダクタンス (L_p) が、クランプの性能を著しく損なうことがあります。内蔵ミラー クランプ (ゲートドライバ IC 内に統合) は部品点数を最小化できますが、IC パッケージや基板レイアウトによってミラー クランプがスイッチから離れた位置になると、これらの寄生効果の影響を受けることがあります。一方、外部実装されたミラー クランプは追加部品を必要としますが、パワースイッチの直近に配置でき、 R_p と L_p を最小限に抑えて dV/dt 誘導ゲートトランジエントを確実に抑制できます。高 dV/dt が生じるアプリケーションでは、誤ターンオンを防ぐために必要な低インピーダンス電流帰路を確保するため、外部クランプが推奨されます。

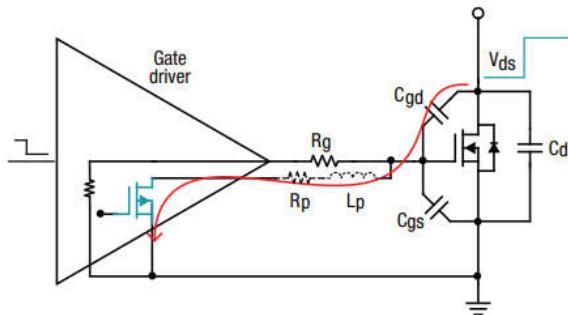


図 5. 内部ミラー クランプ

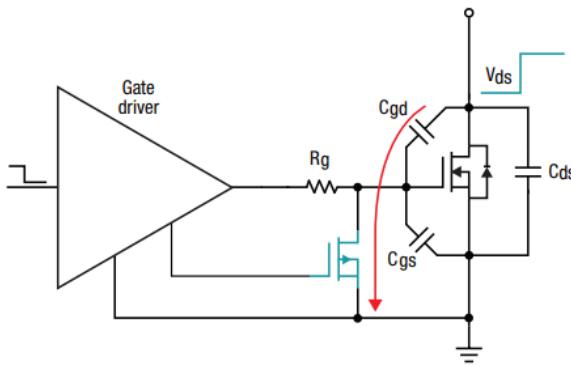


図 6. 外部ミラー クランプ

バイポーラ出力

ゲートドライバは、MOSFET や IGBT などのパワー半導体のスイッチング動作を制御する上で、極めて重要な役割を果たします。一般的なゲートドライバはユニポーラ出力を採用しており、ゲートを 0V から正の電圧（たとえば 15V）まで駆動します。しかし、高電力かつ高速スイッチング環境では、寄生効果による不要なターンオンが発生し、この方式では信頼性に関する懸念が生じる可能性があります。正および負のゲート電圧の両方を印加できるバイポーラゲートドライバは、誤ターンオンおよび誤ターンオフの問題を低減します。

バイポーラゲートドライバでは、スイッチングデバイスのソースまたはエミッタ基準で、ターンオン時に正電圧（たとえば 15V）、ターンオフ時に負電圧（たとえば -5V）を印加します。このデュアルレール方式により、特にハーフブリッジやフルブリッジ構成でハイサイドスイッチの遷移がローサイドデバイスのミラーキャパシタンス (C_{gd}) を介して電流を誘起し得る場合に、ノイズおよび dV/dt 誘発の誤ターンオンに対する耐性が向上します。ユニポーラ方式ではゲートを 0V までしか引き下げることができず、 dV/dt による結合で加わる電圧によってゲートがスレッショルド電圧 (V_{th}) を超え、デバイスが意図せざるオンになる可能性があります。これに対して、負のゲート電圧を用いると実効的な

ターンオンスレッショルドがより離れた位置にシフトし、ノイズへのロバスト性が大幅に向上了します。

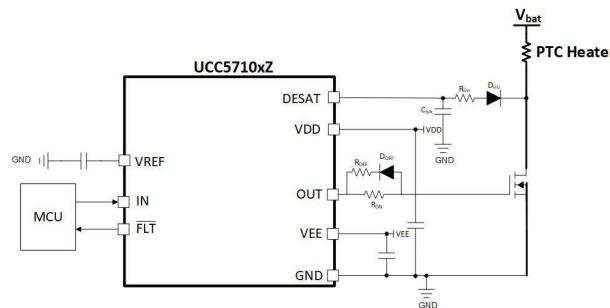


図 7. バイポーラ出力を示す UCC5710xC のアプリケーション図

UCC510xB/Z は外部負電圧生成をサポートしており、専用の負電圧ピン (VEE) に電圧を供給することで、設計者はバイポーラゲートドライブを実装できます。この機能により、ターンオフ時の負バイアスを柔軟に調整でき、ノイズ耐性の向上やミラーキャパシタンスに起因する不要なターンオンの防止に重要な役割を果たします。外部の負電圧源を使用することで、ドライバは多様な電力スイッチングアプリケーションにわたる幅広いゲートドライブ要件に対応できます。

バイポーラゲート駆動の利点は多岐にわたります。バイポーラゲート駆動は、ゲートバウンスや寄生ターンオンに能動的に対抗することで dV/dt イミュニティを提供し、ゲートをグランドポテンシャルより十分低く引き下げることで、より安全で信頼性の高いターンオフを実現し、コンプリメンタリースイッチ構成におけるショートスルーリスクを低減します。さらに、負電圧によりゲート電荷の除去が加速され、スイッチのターンオフを高速化できます。IGBT デバイスに対しては、バイポーラゲート駆動がターンオフ時のテール電流動作や dV/dt の制御にも寄与し、スイッチング性能全体の向上とエネルギー損失の低減につながります。

負電圧バイアスを用いることで、電圧スパイクがターンオンスレッショルドに達するのを防ぎ、SiC MOSFET がオフ状態に留まるようにできます。以下のグラフは、これがどのように機能するかを示しています。

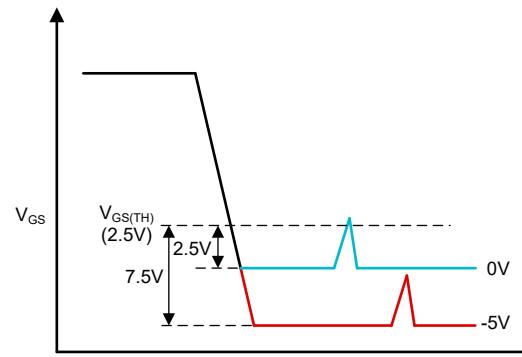


図 8. 異なるターンオフレベルの比較

バイポーラ出力とミラー クランプの違い

要素	バイポーラ ゲートドライブ	ミラー クランプ
基本動作	ターンオフ時にゲート ～ 負電圧 (例:-5 V) を印加します。	内蔵の低抵抗 MOSFET を用いて、ターンオフ時にゲートをソース(0V)にクランプします。
保護レベル	負バイアスにより高いイミュニティを実現します。	イミュニティは中程度で、クランプ強度に依存します。
電圧レベル	負電源レール が必要です。	ユニポーラ電源 (0V/+15V) で動作します。
複雑さとコスト	デュアルレール構成のため、より複雑になります。	構成はより簡素で、多くの場合ゲートドライバに統合されています。
使用事例	過酷なスイッチング環境、高速 dV/dt 回路、高電圧システムに適しています。	汎用用途やコスト重視の設計に適しています。

まとめると、バイポーラ ゲートドライブ技術は、現代の高速パワー エレクトロニクス システムにおいて不可欠であり、高速スイッチングや高電圧環境で一般的な寄生要因によるスイッチング異常に対して、制御性、信頼性、保護機能を強化します。

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の默示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または默示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適したテキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されているテキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](#) やかかるテキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

TIは、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Webツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の默示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または默示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したもので、(1)お客様のアプリケーションに適したTI製品の選定、(2)お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3)お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されているTI製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TIはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TIや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TIおよびその代理人を完全に補償するものとし、TIは一切の責任を拒否します。

TIの製品は、[TIの販売条件](#)、[TIの総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#)またはTI製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TIがこれらのリソースを提供することは、適用されるTIの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TIがカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TIの製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TIはそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025年10月