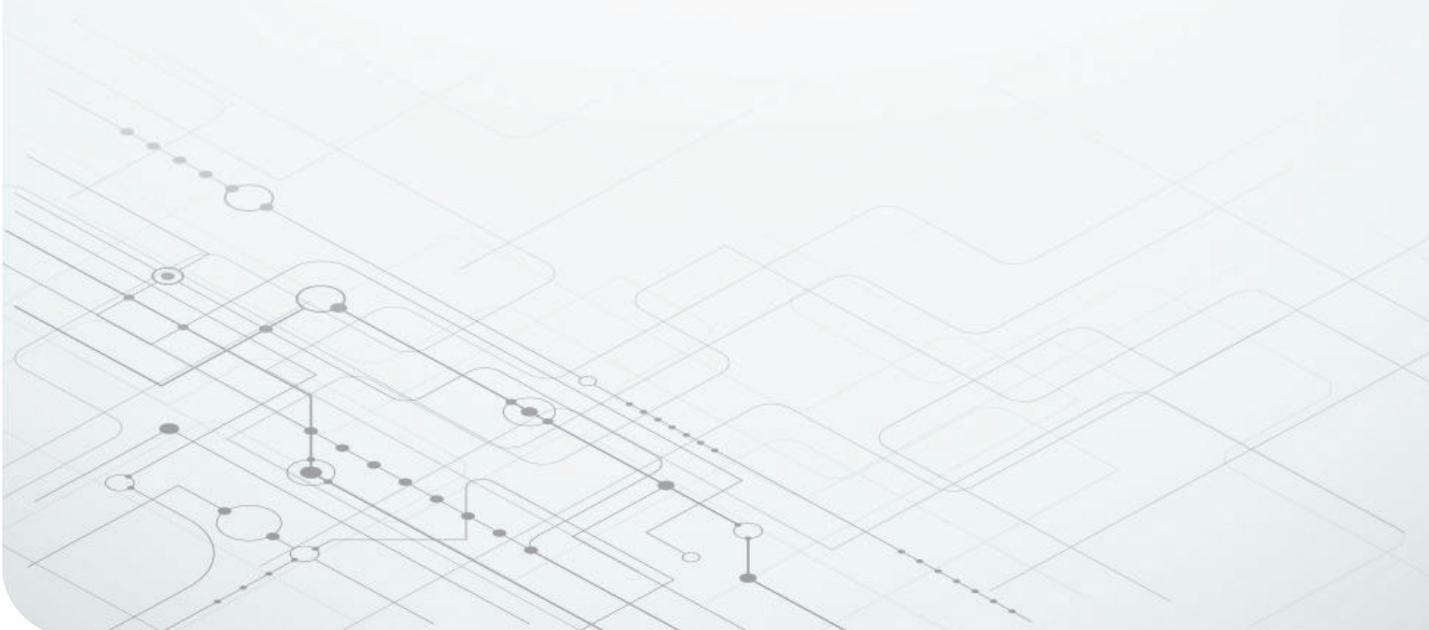


3 相統合型 GaN テクノロジーによりモータードライブ性能を最大化する方法



Manu Balakrishnan
Systems engineer
Motor drivers



概要

- 1 GaN によりインバータ効率が上がる仕組み
- 2 GaN パワー スイッチによるモーター性能の向上
- 3 モータードライブで GaN を使用する場合の設計に関する考慮事項

コンシューマ機器 / 家電、ビルディング エアコン (HVAC) システム、産業用ドライブのエネルギー消費を考慮し、季節エネルギー効率比 (SEER)、最低エネルギー消費効率基準 (MEPS)、Energy Star、トップランナーなどのプログラムを通じて、システム効率等級を確立する取り組みが進んでいます。

可変周波数ドライブ (VFD) は、正確で非常に広範囲の速度制御を備えている場合は特に、エアコン システムで最高のシステム効率を実現します。VFD は、インバータを使用してモーター速度を制御し、高周波パルス幅変調 (PWM) スイッチングを行うことで、真の可変速度制御を実現します。

これらのインバータは現在、絶縁型ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) と金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) をパワー スイッチとして使用して実現されていますが、全体的な損失が大きいため、スイッチング周波数と電力供給には制限があります。ただし、ワイド バンドギャップ技術の進歩に伴い、モータードライブで窒化ガリウム (GaN) ベースのパワー スイッチを採用すると、電力密度、電力供給、効率の向上に役立ちます。

GaN でインバータ効率が向上する仕組み

GaN FET に起因する導通損失は、MOSFET と同様に GaN のオン抵抗に比例します。一方、IGBT の場合、導通損失は二電圧と動的オン抵抗に依存し、一般に GaN FET や MOSFET よりも高くなります。

スイッチング損失に関して、GaN FET は MOSFET や IGBT に比べて損失がはるかに小さくなります。これは、次の理由によります。

- GaN はゼロ逆回復を実現します。ゼロ逆回復により、非常に高い電流スルーレート (di/dt) と電圧スルーレート (dv/dt) で GaN FET のスイッチングを行うことができます。MOSFET では、ボディ ダイオードでゼロ逆回復が大きくなるため、スイッチングの di/dt と dv/dt が制限され、損失が増大して位相ノード電圧リングが発生します。IGBT では、最適化されたアンチパラレル ダイオードを追加しても、逆回復に関連する課題が依然として発生する可能性があります。
- スwitching オフ時、IGBT では少数キャリアの再結合電流 (一般にテール電流と呼ばれる) が生じて、ターンオフ損失が増加します。GaN ではテール電流は発生しません。
- GaN は IGBT や MOSFET に比べて容量が小さいため、容量性のスイッチング損失が小さくなります。
- 制御された高速な di/dt および制御された dv/dt により、スイッチング中の電圧と電流のオーバーラップ損失を最適化できます。

図 1 は、GaN、IGBT、MOSFET をそれぞれベースとするソリューションの理論的なインバータ効率の比較を示しています。スイッチング周波数は 20kHz で、GaN ベースのインバータの位相ノード電圧スルーレートは 5V/ns に制限されており、周囲温度は 55°C です。GaN ソリューションでは電力損失を少なくとも半分に低減できることがわかります。

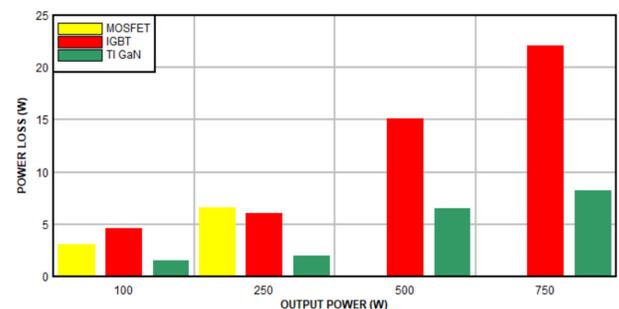


図 1. GaN、MOSFET、IGBT の各ソリューションの効率比較

図 2 は、テキサス・インスツルメンツ (TI) の DRV7308 3 相 GaN インテリジェント パワー モジュール (IPM) と 5A ピーク

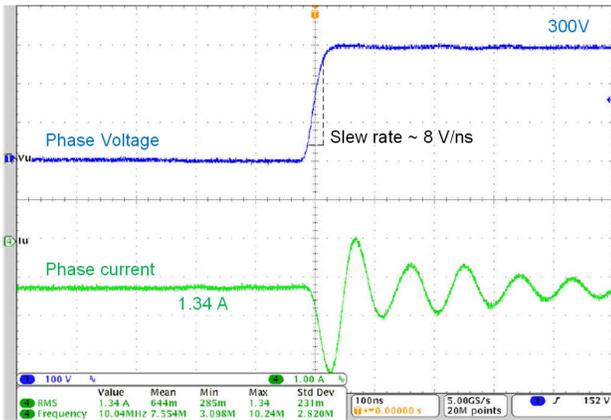


図4. 2m のケーブルとファン モーターを使用した場合の位相ノード電圧の立ち上がりスルーレート

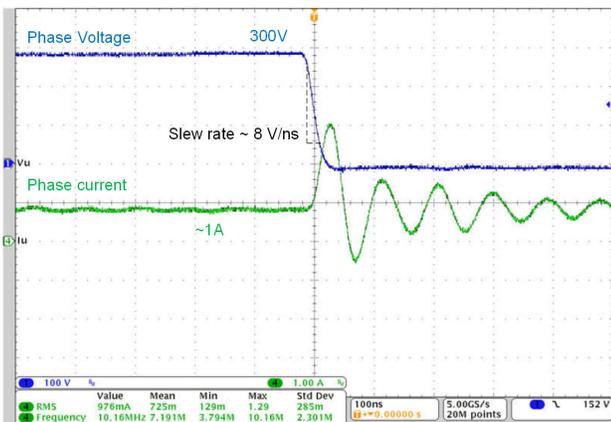


図5. 2m のケーブルとファン モーターを使用した場合の位相ノード電圧の立ち下がりスルーレート

システム効率への影響

エアコン システムや冷凍システムでは、多くの場合、コンプレッサと暖房システムの効率を最大限に高めるために、非常に幅広い速度制御が必要になります。従来型の IPM では、デッドタイムが $1\mu\text{s}$ を超え、伝搬遅延が 500ns を超えるため、PWM の最大と最小の動作デューティ サイクルが制限され、動作速度範囲が狭くなります。また、デッドタイムが長いと、モーターで利用可能な電圧が低下し、同じ電力供給に対するモーター電流の量も増加します。

DRV7308 は適応型デッドタイム機能を備えているため、最大デッドタイムは 200ns 未満、伝搬遅延は 200ns 未満となります。これにより、設計者は PWM の動作デューティ サイクル範囲と速度範囲を拡張すると同時に、モーターに供給可能な電圧を増やすこともできます。たとえば、エアコン システムで超低速から高速まで制御できるため、設計者は起動時に最

高速度を設定して、システムの冷暖房を迅速化できます。設定温度になった後、エアコンの負荷の変化に応じて、より細かい低速および容量制御を行うことができます。このより細かい最適な負荷ポイント制御は、システム効率の向上に役立ちます。

デッドタイムと伝搬遅延が非常に短く、伝搬遅延の不整合も小さいため、フィールド オリエンテッド制御ドライブでは特に、正確な平均電流センシングが可能になり、制御の精度が向上します。図 6 に、伝搬遅延が平均電流センシングの精度に及ぼす影響を示します。PWM 中、PWM オン期間の途中で電流をサンプリングすると、各 PWM サイクルの平均モーター電流が得られます。図 6 は、どのように伝搬遅延によって電流センシングが中間値から逸脱するかも示しています。電流センシングの誤差 (ΔI) は、伝搬遅延、印加電圧、PWM スwitchング周波数、モーター インダクタンスに依存します。低インダクタンスのモーターでは、誤差は大きくなります。電流センシングの誤差は、センサレス制御ドライバのモーター位置センシング (推定機能) の精度にも影響を及ぼします。モーター位置の推定に誤差があると、モーターの効率が低下します。DRV7308 は伝搬遅延と伝搬遅延の不整合が非常に小さいため、正確な平均電流センシングを実現して、モーターの効率を向上させることができます。

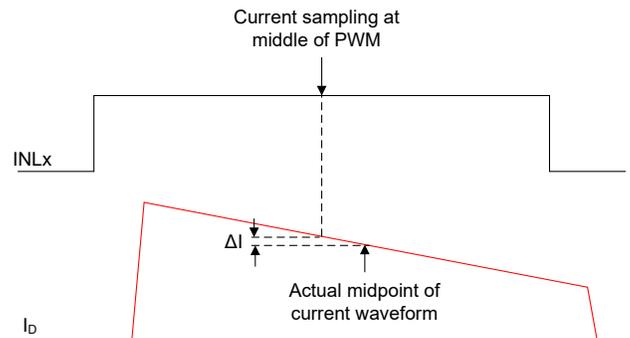


図6. 伝搬遅延が電流センシングの精度に及ぼす影響

可聴ノイズへの影響

モーター ドライブ システムにおける可聴ノイズの主な発生源の 1 つは、電流歪みに起因するトルクリップルです。モーターの場合、電流歪みは PWM 周波数、デッドタイム、電流センシングの精度など複数の要因に依存します。

DRV7308 はスイッチング損失を大幅に低減し、IGBT ベースまたは MOSFET ベースのソリューションに比べて、より高い

PWM 周波数を実現できます。スイッチング周波数が高くなるほど、巻線電流リップルが小さくなるため、周波数の可聴範囲を超える小さいトルクリップルを実現できます。

IGBT ベースと MOSFET ベースのシステムでは、デッドタイムが $1\mu\text{s}$ ~ $2\mu\text{s}$ またはそれ以上になるため、モーターの電流歪みが大きくなります。デッドタイム歪みは 60 度の電気角ごとに発生し、電流波形に 6 次高調波が生じますが、一般にこれは可聴周波数範囲内になります。DRV7308 の適応型デッドタイム ロジックでは、200ns 未満のデッドタイムを実現できるため、電流歪みを最小限に抑えて可聴ノイズを低減できます。

図 7 は、DRV7308 を $0.2\mu\text{s}$ のデッドタイムで、IGBT IPM を $2.5\mu\text{s}$ のデッドタイムでテストした場合のモーター巻線電流の全高調波歪み (THD) を比較したものです。IGBT IPM に比べて、DRV7308 の歪みは非常に小さくなっています。電力供給量が少ない IGBT IPM では、デューティ サイクルが低く、つまりインバータの変調指数が低く、デッドタイムの影響が大きくなるため、この歪みは指数関数的に大きくなります。

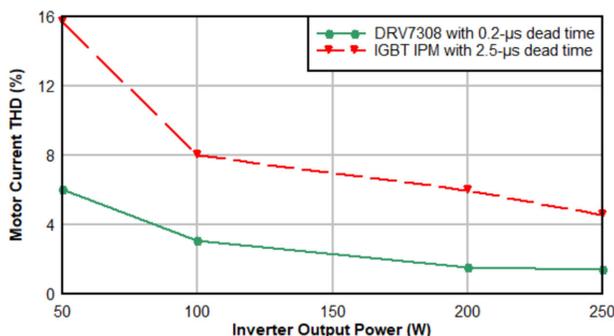


図 7. デッドタイムによるモーター電流 THD の比較

伝導型と放射型の電磁波に関する考慮事項

伝導型と放射型の電磁波は、スイッチング周波数、 dv/dt 、 di/dt 、スイッチング電圧の発振と反射、スイッチング電流のループ面積に依存します。

DRV7308 は、次のような複数の設計手法とプリント基板 (PCB) レイアウト オプションを採用して、EMI や電磁両立性の問題に対処しています。

- **PWM スwitching 周波数** スwitching 周波数が高いほど、EMI 周波数スペクトルへの影響も大きくなります。スウィッチング周波数を高くすると、伝導型電磁波に対処するた

めの電流リップルとコンデンサに関する要件を減らすことができます。DRV7308 は、非常に小さな値から 60kHz までの幅広いスウィッチング周波数に対応しています。設計者は、システム性能と EMI 要件に基づいて最適な周波数を選択できます。

- **dv/dt** DRV7308 プリドライバは、位相ノード スwitching のスルーレートを制御して、EMI 要件を満たすことができます。
- **di/dt** ゼロ逆回復と小さい寄生成分により、GaN は、スウィッチング時に位相ノードで電圧のオーバーシュートや発振を引き起こすことなく、優れたスウィッチング性能を実現できます。図 4 と図 5 は、EMI の低減を可能にする DRV7308 のクリーンなスウィッチングを示しています。
- **スウィッチング電流の小さいループ面積** ローカル デカップリング コンデンサによって、スウィッチング時にパルス電流を供給します。DRV7308 は、DC 電圧デカップリング コンデンサ (C_{VM}) までのスウィッチング電流のループ面積が非常に小さくなるように設計されています (図 8 を参照)。

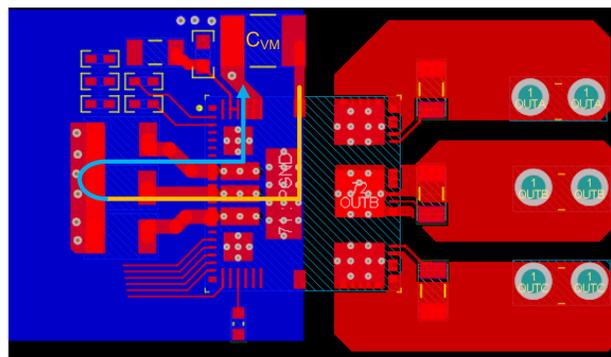


図 8. 電流のループ面積が小さい、DRV7308 の一般的なレイアウト リファレンス

ソリューション サイズへの影響

DRV7308 では、パッケージ サイズの小型化とヒートシンクの除去に加えて、モーター電流センシング用のオペアンプ、電流制限用の 3 つのコンパレータ、温度センサ、各種の保護機能など、高度な統合を図っています。このような統合により、IGBT ベースまたは MOSFET ベースのソリューションに比べてインバータ基板サイズを最大 55% 縮小できます。

サイズを縮小すると、インバータをモーターの近くに統合することもできます。これは、ファン、ブロワ、ポンプのような使用事例に役立ち、インバータ基板からモーターまでのケーブル

を不要にすることができます。このケーブルを除去することで、ケーブル容量に起因するスイッチング損失もなくなり、長いケーブルに起因する伝導型と放射型の EMI も低減されます。

保護された堅牢なシステム設計

GaN では、飽和を除去するために、より高速で信頼性の高い過電流保護が必要になります。内蔵の保護機能は寄生成分の影響を排除し、数百ナノ秒単位の高速な応答を実現します。過負荷状態時の熱暴走を防止するために、インバータとモーターには過電流保護が必要です。

230V_{AC} ライン電源のモータードライブは、AC ラインの電圧耐性により、またはアクティブ力率補正回路を使用して、最大 450V_{DC} の整流 DC バス電圧を供給できます。インバータは、450V の動作電圧を想定して設計する必要があります。一部のモータードライブでは、モーターで生成された逆起電力が電源電圧を超えた場合や、誘導性キックバックが発生した場合に、より高い電圧を短時間処理する必要があります。また、インバータでは、入力ライン電圧サージや電気的高速過渡イベントなどの過電圧シナリオが発生した場合に損傷を防ぐために、高いオフ状態ブロッキング電圧を処理する必要があります。

DRV7308 は、過電流イベント時に GaN FET を保護できるように、ドレイン - ソース間電圧保護機能を内蔵しています。また、サイクル バイ サイクル電流制限用の内蔵型過電流コンパレータを備えており、650V のオフ状態ブロッキング電圧定格で 450V の動作電圧に対応できるよう設計されています。低電圧、過電流、ピン間の短絡などのフォルトシナリオについても、他の保護機能によって監視します。

まとめ

DRV7308 など、GaN ベースの IPM の進歩は、家電製品や HVAC システムのモータードライブにおける電力密度、電力供給、効率の向上を促進すると同時に、システムコストの削減や信頼性の向上にもつながります。

その他の資料

- [DRV7308 3 相 650V、5A、GaN インテリジェント パワー モジュール データシート](#)
- [GaN IPM の製品ラインアップ](#)
- [TI の GaN テクノロジーの詳細](#)
- [スロットレス永久磁石モーターの鉄損や性能に対する PWM スwitching 周波数と変調指数の影響](#)
- [AC 電動ドライブでのワイド バンドギャップ デバイス:機会と課題](#)

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

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

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黙示保証、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、明示的または黙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す。(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、

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](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 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。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。

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、TI 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 © 2024, Texas Instruments Incorporated