

トラクション・インバータ – 自動車の電動化を支える推進力



Audrey Dearien
Applications manager
Isolated gate drivers

Krunal Maniar
Product marketing engineer
Isolated precision ADCs

VC Kumar
Marketing manager
Sitara™ processors

Waqar Mehmood
Marketing manager
C2000™ real-time microcontrollers

ハイブリッド電気自動車 (HEV) および電気自動車 (EV) 向けのトラクション・インバータを注意深く設計すれば、電力密度を維持したままで、モーターの高速化、効率の向上、システム・サイズの小型化を実現できます。新しいテクノロジーにより、自動車メーカーは、より長い航続距離と最適な性能を備えた将来の自動車を生み出すことができます。

概要

トラクション・インバータの設計トレンドと、関連する半導体テクノロジーおよび部品について詳細に説明します。



1 EV トラクション・インバータの設計トレンドを確認

高性能、高効率、高信頼性のトラクション・インバータシステムを実現する現在のトレンドを理解できます。

1



2 高速電流センシング・フィードバック・ループと高速コントローラにより効率を向上

電流センシング・フィードバック・ループが車両の速度と性能にかなりの影響を及ぼす理由を確認できます。

2



3 ゲート・ドライバとバイアス電源を使用して EV の航続距離を延長する方法

シリコン・カーバイド (SiC) MOSFET (金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ) および高電圧と、適切な部品との組み合わせによって、EV の運転体験が向上します。

3

EV トラクション・インバータの設計トレンドを確認

トラクション・インバータは、バッテリーのエネルギーを電力に変換してトルクと速度を制御します。これは、EV の航続距離、性能、運転体験に最も影響を及ぼします。トルクはモーターのサイズに比例し、電力はトルクと速度を発生させます。電力が一定の状態では、モーターのサイズとトルクを小さくするためには、速度を上げる必要があります。これは難しい課題です。特

に、機械的または電氣的な非理想性による損失など、設計上の非効率が存在すれば、部品のサイズは、通常、電力レベルやトルクに応じて大きくなるからです。したがって、モーターのサイズだけでなく、トラクション・インバータ自体の電気系も縮小することが重要になります。

電力レベルを維持したままで、駆動範囲を拡大し、モーターのサイズと重量を低減するには、トラクション・モーターを高速 (>30,000rpm) で動作させる必要があります。そのためには、高速なセンシングと処理、および DC から AC への効率的な電圧変換が必要です。これらの目標を達成するためのトラクション・インバータ設計のトレンドとして、高度な制御アルゴリズムの採用、出力段スイッチング・トランジスタへの SiC MOSFET 使用、高電圧 800V バッテリー使用、複数のサブシステム統合による高い電力密度の実現、などが挙げられます。

高速電流センシング・フィードバック・ループと高速コントローラにより効率を向上

安定したクルーズ・コントロール、応答性の高い加速と減速、より静かな車内環境などの EV 運転体験を向上させる 1 つの方法は、電流センシング・フィードバック・ループの全体的な精度と信頼性を良くすることです。この制御ループは、トラクション・インバータの各相出力から検出電流を取得し、絶縁型高精度アンプからマイクロコントローラ (MCU) を経由して一連の処理を行う経路です。この過程を経て、最終的にトラクション・インバータの制御出力に戻る信号が得られます。モーター制御ループを最適化すると、高速で高精度のフィードバックが可能になり、モーターが速度やトルクの変化に迅速に反応できます。図 1 の背景が着色された部分は、モーター制御ループを示しています。

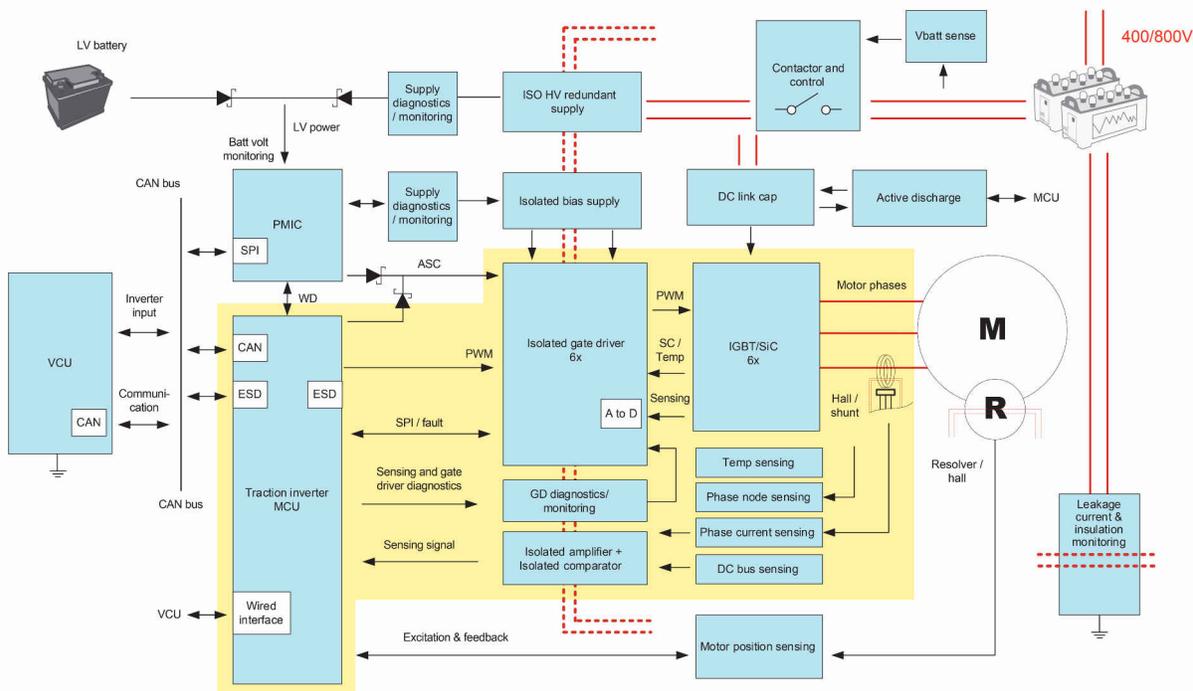


図 1. モーター制御ループと出力段を黄色で示したトラクション・インバータのブロック図。

図 2 に示すように、絶縁型半導体部品は、通常、トラクション・インバータ内の電力回路と制御回路を絶縁します。3 個の絶縁型アンプまたは変調器は、シャント抵抗を通じてモーター電流を測定し、磁界方向制御 (FOC) のためのマイコンのアルゴリズムに信号を供給します。モーター速度を上げる必要がある場合、より帯域幅の大きい電流センシング・フィードバックループが必要になります。これは、計測した相電流を使って、変化したインバータ出力をできるだけ早く生成する必要があるということを意味します。電流センシング・フィードバックループのレイテンシは、特に優先すべき事項です。パワー・トランジスタ (図 1 に示す IGBT (絶縁ゲート・バイポーラ・トランジスタ) / SiC MOSFET) のスイッチング周波数は、数十 kHz に達しており、高い回転速度を実現するためには、制御信号によってサイクルごとにパルス幅を変更する必要があります。大電流により発生するノイズも、ループの信頼性に影響を及ぼします。

絶縁型アンプはノイズ源のすぐ隣に配置されているので、電力回路と制御回路の間でノイズ干渉を最小限に抑えながら、信頼性の高い動作を実現することが重要です。この理由から、電流センシング・ループでは、電源グラウンドと信号グラウンドの間に、高い過渡ノイズ耐性を持つガルバニック絶縁アンプが必要になります。部品を適切に選択すれば、正確な電流セ

ンシング・ループによって 3 つの相電流の高調波歪みを制限し、加速およびブレーキ条件時のスムーズなモーター速度およびトルク制御をサポートできます。高精度な電流センシング・グループは、電氣的損失の防止にも役立ち、駆動中の振動を最小限に抑えます。AMC1300B-Q1 および AMC1311B-Q1 などの絶縁型アンプや、AMC1306M25 および AMC1336 などの絶縁型変調器は、200kHz を超える帯域幅、2 μ s 未満のレイテンシ、100kV/ μ s を超える同相過渡耐性 (CMTI) のあるガルバニック絶縁により、正確な電流および電圧測定をサポートします。

MCU は、所定の三相電流測定を A/D コンバータ (ADC) によって実施し、その測定値を迅速にデジタル化してメイン・アルゴリズムへ供給し、トラクション・インバータの出力のためのパルス幅変調 (PWM) を生成する必要があります。モーター制御の設計で一般的に使用される FOC アルゴリズムには、高速フーリエ変換 (FFT) や三角関数などの複雑な演算が必要です。そのため、特に 20kHz 以上のスイッチング周波数での高い処理能力が求められます。

トラクション・インバータのモーター制御機能と安全機能の両方を処理できるように、MCU の能力負荷を分散することが重要です。高速 FOC を実装することにより、MCU の電力およ

び処理能力に対する余裕が拡大し、モーター制御と機能安全の両方を処理できます。C2000™ **TMS320F28377D**、**TMS320F28386D**、**TMS320F280039C**、Sitara™ **AM2634-Q1** などのリアルタイム・マイクロコントローラは、3MSPS 超の ADC によるセンシング、複数の最適化されたコアによる処理能力を活用して、複雑な制御演算を迅速に実行し、高速な制御ループ性能を実現します。アクチュエータ駆動

用の高分解能 PWM が密接に統合されているため、高精度のデューティ・サイクルを生成してモーター制御を最適化できます。トラクション・インバータ向けに最適化されたこれらの回路 (ADC 入力、FOC アルゴリズム実行、PWM 書き込み) を組み合わせることで、4μs 未満の制御ループ・レイテンシを実現できます。

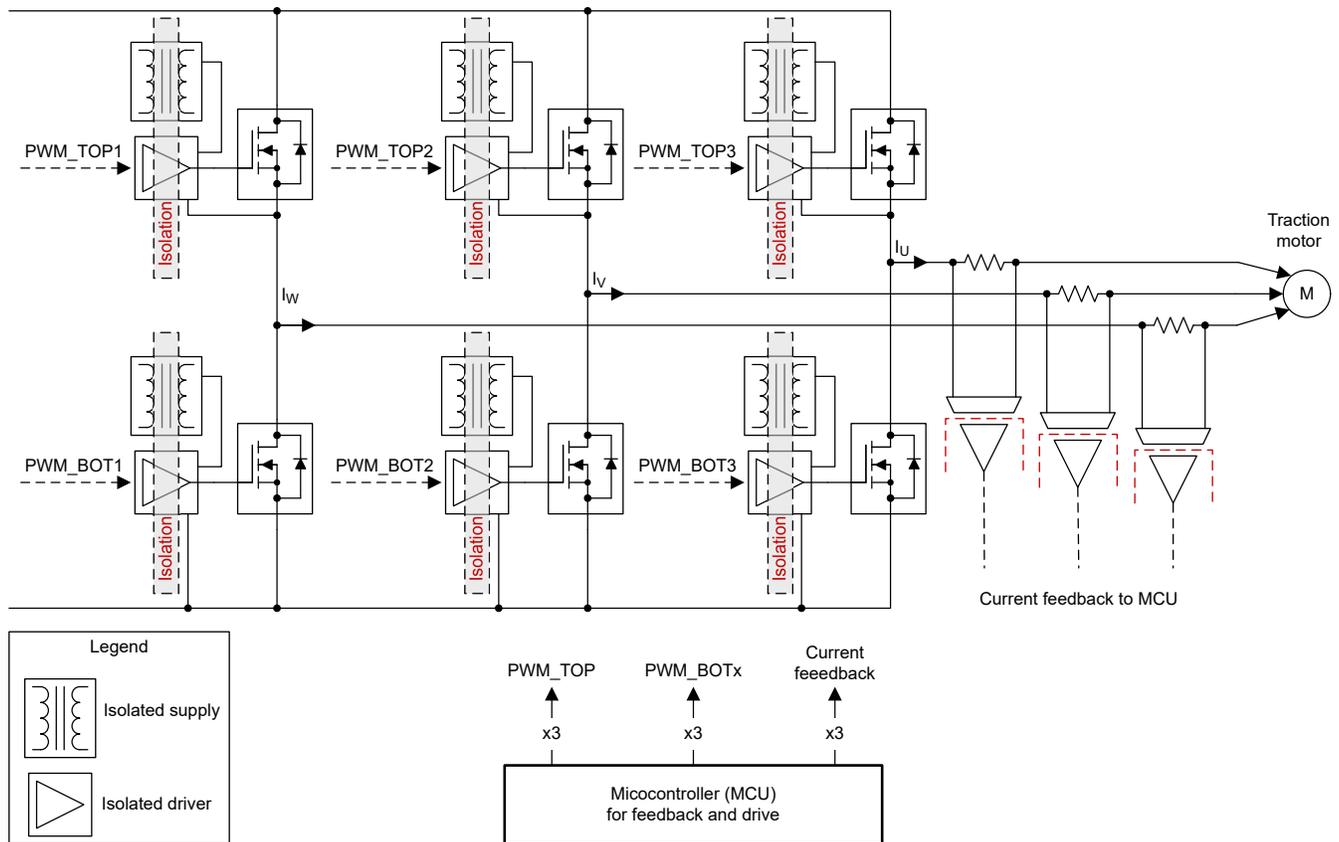


図2. トラクション・インバータ内の電流センシング・フィードバック・ループ。

ゲート・ドライバとバイアス電源を使用して EV の航続距離を延長する方法

MCU および電流センシング・ループによって生成された制御信号は、出力段に供給されます。出力段は、バッテリーとモーターの間を結びつける回路です。この出力段は、大容量コンデンサ・バンクによってデカップリングされた高電圧 DC バスに、IGBT または SiC MOSFET などの三相パワー・トランジスタが接続されたものです。出力段は、DC 電圧を AC に変換するときの電力損失を最小限に抑えるとともに、バッテリーを効率的に使用するためにサイズを小さくする必要があります。これにより、車両の航続距離が増加します。ただし、高電圧大電力の部品は、通常、大きくなるので、これは困難な課題です。幸いなことに、技術的なブレークスルーにより、同じ部品サイズを保ったままで、より高い電力レベルが得られるようになりました。

トラクション・インバータのサイズに影響を及ぼす 2 つの要因は、高電圧トランジスタの種類とバッテリーの電圧レベルです。SiC MOSFET は、同じ電圧定格の IGBT と比較してスイッチング損失が小さく、ダイ・サイズが小さいため、一部のエンジニアはトラクション・インバータの設計に SiC MOSFET を使用

しています。SiC トランジスタを適切に制御すると、温度、速度、トルクなど、インバータが動作するあらゆる条件で損失の低減と信頼性の向上を実現し、航続距離を延長できます。

SiC MOSFET は効率的ですが、他のトランジスタと同様にスイッチング時に電力損失が発生し、このスイッチング損失がトラクション・インバータの効率に影響を及ぼす可能性があります。図 3 に示すように、スイッチング過渡時の電圧と電流のエッジはオーバーラップし、電力損失が発生します。ゲート・ドライバの出力電流が大きいと、SiC FET ゲートの充電と放電が高速になり、電力損失を低減できます。ただし、温度、電流、電圧の組み合わせによっては、できるだけ高速に切り替えることが最善の方法であるとは限りません。SiC FET での電圧の高速な遷移、すなわちドレイン・ソース間電圧 (VDS) の過渡電圧 (dv/dt) は、グラウンドに流れる電流という形で電圧オーバーシュートと電磁干渉 (EMI) を発生させます。大きい dv/dt によって、巻線間の静電容量で短絡が発生する可能性があるため、モーター自体に問題が生じることもあります。ゲート・ドライバ回路は、電力損失とスイッチング過渡の両方を制御できます。

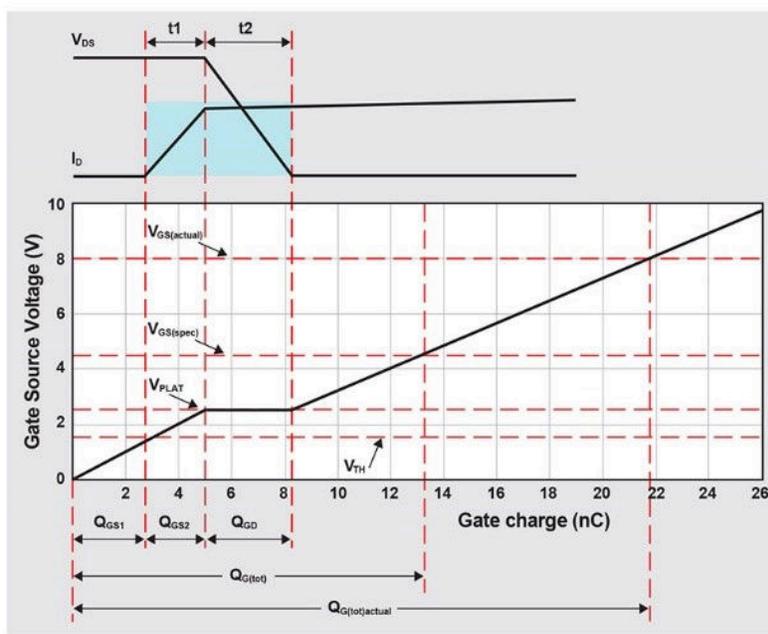


図 3. MOSFET のターンオン充電プロファイルと、 V_{DS} および I_D のオーバーラップに起因するスイッチング損失。

ゲート抵抗を使ってゲート・ドライバの出力ソースおよびシンク電流を制御すると、dv/dt と電力損失の間のトレードオフを最適化できます。出力駆動強度を調整して、温度および電流の

全域にわたって SiC MOSFET スルーレートの変化を最適化できるゲート・ドライバの実装を図 4 に示します。

調整機能は、EMI の低減および損失の低減を可能にし、その結果、効率が向上して駆動範囲が拡大するため、トラクション・インバータの性能にとって有益です。TI の **UCC5870-Q1** および **UCC5871-Q1** ゲート・ドライバは、30A の駆動能力を備えているため、ゲート抵抗の変更と最適化で調整可能なゲート・ドライブ・ソリューションを非常に簡単に実装できます。さらに、ガルバニック絶縁および 100kV/μs の CMTI により、高速スイッチング SiC テクノロジーを使用する高電圧アプリケーションで使いやすくなっています。

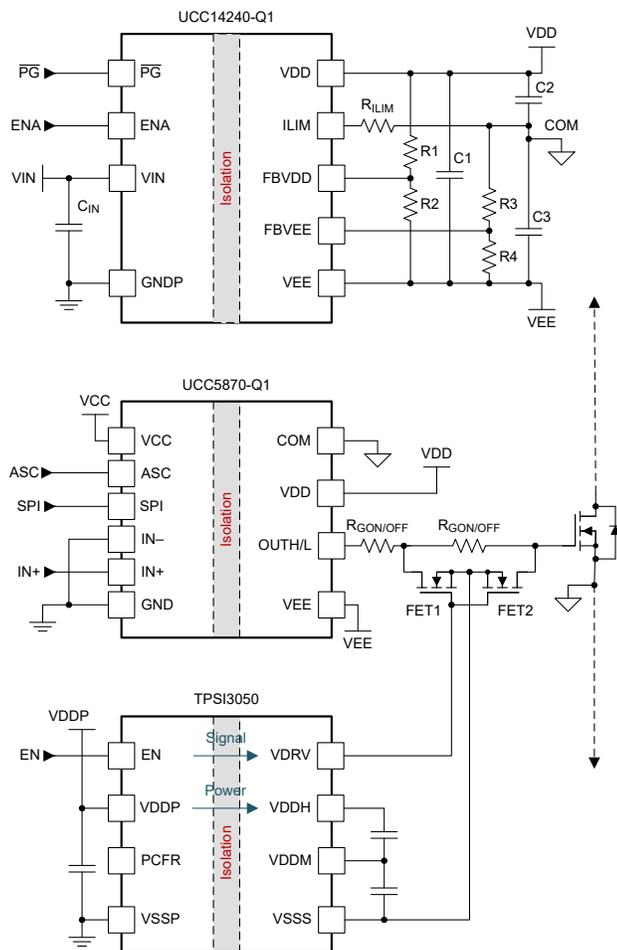


図4. UCC14240-Q1 から電力を供給される UCC5870-Q1 を使用した、調整可能なゲート・ドライバ出力回路のブロック図。

バッテリーの電圧レベルは、システムで発生する dv/dt の大きさにも影響を及ぼします。また、同じ電力密度と面積を維持したままで、EMI を最小化すると同時に、絶縁安全規格を満たす部品を選択する必要がある場合には、困難な課題が発生します。SiC MOSFET は、小型ダイ・サイズで 1,200V を超える高いブレークダウン電圧をサポートしているため、800V EV

バッテリー・アプリケーション向けの電力密度の高いソリューションを実現できます。

電源の絶縁と良好なレギュレーションが必要な場合には、高電圧 SiC MOSFET のゲート電圧要件への対応は困難になります。ゲート電圧の影響は、図 5 に示す SiC MOSFET の電流電圧特性曲線を見れば明らかです。このグラフでは、ゲート・ソース間電圧 (V_{GS}) が高いほど、リニア領域でより傾きの大きい曲線になっています。曲線の傾きが大きいということは、ドレイン・ソース間のオン抵抗 ($R_{DS(on)}$) が小さいことを意味しており、導通損失を最小限に抑えて、熱暴走を回避できます。

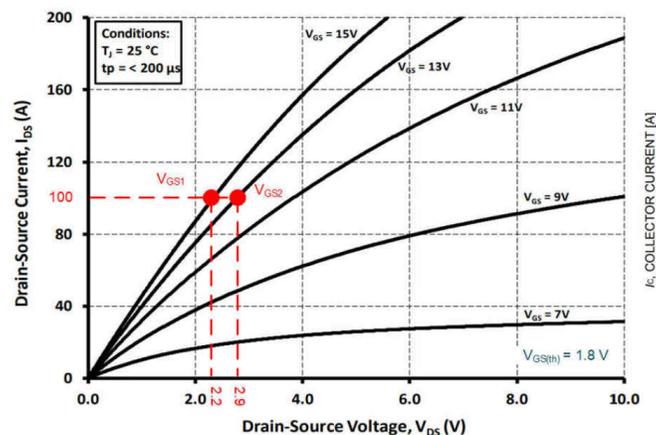


図5. V_{GS} に基づく SiC MOSFET の電圧および電流特性。

ゲート・ドライバに電力と電圧を供給する絶縁型バイアス電源は、高速過渡時に適切な正のゲート電圧を維持し、また、負の電圧にも対応して SiC FET を安全にオフに維持する必要があります。半導体スイッチング・コントローラ付きのトランスは、絶縁型電源の構成によく使われています。ただし、このように複雑な設計は、電力効率と EMI の両方の観点から、出力の性能に直接影響を及ぼします。巻線間静電容量によって同相電流が大きくなり、EMI の発生につながるため、容量を小さくする必要がありますが、サイズ、電圧定格、効率の間でトレードオフが発生するため、設計時間が長くなります。

UCC14241-Q1 および UCC1420-Q1 などの統合パワー・モジュールを使用すると、1 次側と 2 次側との間の絶縁容量を 3.5pF 未満で良好に制御できるため、高速スイッチング SiC MOSFET で 150V/ns を超える CMTI を実現できます。HEV/EV サブシステムの設計は、トラクション・インバータと DC/DC コンバータの組み合わせなど、さらなる統合が進んでいます。UCC14241-Q1 は、図 6 に示すように、フライバッ

ク・コンバータを使用する標準的なバイアス電源ソリューションに比べて、部品表 (BOM) 実装面積を約 40% 削減できます。ディスクリート・トランス設計と比較して高さは大幅に低く、その結果、重心が低くなり、振動耐性が向上します。これらの要因を通じて、トラクション・インバータ・システムは、パワー・トランジスタの効率的な駆動に適した電圧を供給すると同時に、優れた信頼性と耐用寿命を実現しています。

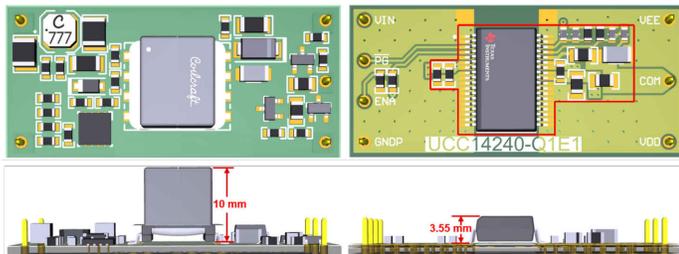


図6. 標準的なフライバック・コンバータ・バイアス・ソリューションと UCC14240-Q1 の BOM 実装面積と高さの比較。

まとめ

EV のために、処理内容からパワー半導体に至るまで、基板全体で技術革新が進んでいます。モーター制御およびパワー・トレインの設計は、EV の航続距離と運転性能に直接的な影響を及ぼします。高精度の電流センサおよびスマート MCU をリアルタイム制御と組み合わせることで、レイテンシの短縮とモーター制御ループの精度向上が可能になり、速度とトルクの滑らかな遷移を実現できます。高調波歪みが小さくなって、電氣的効率と航続距離が向上します。また、モーターの振動も改善されるので、不快な駆動を防止できます。

SiC MOSFET および 800V テクノロジーの採用により、トラクション・インバータの電力密度と効率が向上し、さまざまなパワー・トレイン機能を統合して、最終的には、充電 1 回あたりの航続距離延長が可能になります。TI の統合型半導体テクノロジーの幅広い製品ラインアップによって、自動車メーカーおよびティア 1 サプライヤは、高性能と低コストを実現できるフレキシビリティが得られます。

TI のトラクション・インバータ・テクノロジーの詳細については、こちらをご覧ください。

- TI.com の [高電圧トラクション・インバータランディング・ページ](#)
- [ASIL D 安全性コンセプト検証済み、高速トラクション、双方向 DC/DC 変換のリファレンス・デザイン](#)
- [車載用 SPI プログラマブル・ゲート・ドライバおよびトランス内蔵バイアス電源のリファレンス・デザイン](#)

トラクション・インバータ・システム向け TI 製品の詳細については、こちらをご覧ください。

- [C2000](#) リアルタイム MCU
- [AM2634-Q1](#) Arm® Cortex®-R5F MCU
- [UCC5870-Q1](#) 高度なプログラマブル絶縁型ゲート・ドライバ
- [UCC14240-Q1](#) トランス内蔵 DC/DC モジュール
- テキサス・インスツルメンツ: [トラクション・インバータ向け AM263x](#)
- テキサス・インスツルメンツ: [トラクション・システム向け AM263x のベンチマークおよび分析](#)

この資料の他の筆者は、次のとおりです。

- Han Zhang、システム・エンジニア
- Sean Murphy、製品マーケティング・エンジニア
- Robert Martinez、システム・エンジニア
- Dongbin Hou、システム・エンジニア
- Francisco Lauzurique、アプリケーション・エンジニア

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。

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the US and/or elsewhere. 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](https://www.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 © 2022, Texas Instruments Incorporated