

## Technical White Paper

## EV (電気自動車) のトラクション・インバータで設計の優先順位が性能最適化の場合



Xun Gong

Systems Manager, HEV/EV Traction Inverter

## 概要

このテクニカル・ホワイト・ペーパーは、トラクション・インバータに関するシステム上の主なトレンド、アーキテクチャ、テクノロジーについて説明します。絶縁、高電圧ドメイン、低電圧ドメイン・テクノロジーなど、トラクション・インバータを実現するために使用されるデバイスとテクノロジーについても説明します。最後に、このドキュメントでは、トラクション・インバータの設計時間を短縮するためのシステム・エンジニアリングの概念と設計に焦点を当てています。

## 目次

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 1 概要.....                            | 2  |
| 2 アーキテクチャとトレンド.....                  | 3  |
| 3 トラクション・インバータを実現するための重要なテクノロジー..... | 4  |
| 4 マイコン.....                          | 6  |
| 4.1 Sitara ファミリー.....                | 6  |
| 4.2 リアルタイム制御マイコン.....                | 7  |
| 5 絶縁型ゲート・ドライバ.....                   | 8  |
| 6 低電圧バイアス電源.....                     | 10 |
| 7 高電圧バイアス、冗長電源.....                  | 11 |
| 8 DC リンク・アクティブ放電.....                | 11 |
| 9 モーターの位置センシング.....                  | 12 |
| 10 絶縁型電圧 / 電流センシング.....              | 13 |
| 11 システム・エンジニアリングとリファレンス・デザイン.....    | 13 |
| 12 まとめ.....                          | 14 |
| 13 関連資料.....                         | 14 |

## 図の一覧

|   |    |
|---|----|
| 図 2-1. 3 レベル T タイプ・インバータ.....                     | 3  |
| 図 3-1. トラクション・インバータ・システム・ブロック図.....               | 5  |
| 図 4-1. AM2634-Q1 を使ったトラクション・インバータ・システムのブロック図..... | 6  |
| 図 4-2. トラクション・インバータ制御の TMU による改善.....             | 7  |
| 図 5-1. UCC5870-Q1 のゲート・ドライブ強度.....                | 8  |
| 図 5-2. 競合デバイスのゲート・ドライブ強度.....                     | 8  |
| 図 5-3. UCC5870-Q1 可変ゲート・ドライブ実装の設計図.....           | 9  |
| 図 5-4. UCC5870-Q1 可変ゲート・ドライブ実装の設計ボード.....         | 9  |
| 図 5-5. 5.5Ω のゲート抵抗による弱い駆動.....                    | 9  |
| 図 5-6. 0.5Ω のゲート抵抗による強い駆動.....                    | 9  |
| 図 6-1. UCC14240-Q1 の EVM ボード.....                 | 11 |
| 図 8-1. スマート AFE に基づく DC リンク・アクティブ放電.....          | 12 |
| 図 8-2. テスト波形.....                                 | 12 |

## 表の一覧

|  |   |
|--|---|
| 表 5-1. 400V バス電圧でのスイッチング・エネルギーの比較..... | 9 |
|--|---|

## 商標

C2000™, Code Composer Studio™, and LaunchPad™ are trademarks of Texas Instruments.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 概要

トラクション・インバータは、電気自動車 (EV) のドライブトレイン・システムの中核です。そのため、インバータは、EV が世界中で採用されるうえで重要な役割を果たします。トラクション・モータは、バッテリーまたはジェネレータからの DC 電力を AC 電力に変換して、永久磁石同期型モータ (PMSM)、誘導モータ (IM)、外部の励起同期モータ (EESM)、スイッチト・リアクタンス・モータ (SRM) などのトラクション・ドライブ・モータに電力を供給することで優れたトルクと加速を実現します。またトラクション・インバータはモータからの再生エネルギーを変換し、車両が惰行中またはブレーキ中にバッテリーを再充電します。

トラクション・インバータの性能を測定する際には、設計上のいくつかの重要な優先事項とトレードオフを考慮する必要があります。

- 安全機能とセキュリティ機能の設計は通常、ISO 26262 または EVITA (e-safety vehicle intrusion protected applications) のプロセスに準拠しています。このプロセスには、安全診断、システム・レベルの故障モードと影響の分析、故障モード、影響、診断分析、ハードウェア・セキュリティ・モジュール (HSM) が含まれます。
- 重量と電力密度 – ワイド・バンド・ギャップ・スイッチとパワートレインの統合は、電力密度の高いインバータ設計を可能にする重要なテクノロジーです。OEM のインバータ電力密度の目標は、たとえば米国市場では 2025 年まで 100kW/L を継続しています。SiC を使用すると、800V の DC バス電圧を実現し、電流定格とワイヤ・ハーネスを低減できます。高速制御ループを搭載したマイコンを使用すると、高速で軽量なモータが使用でき、DC-DC コンバータを内蔵したインバータなどのパワートレインを統合することができます。
- 効率 – システムの効率には、回生ブレーキ・モードでのトラクション・インバータの効率、モータの効率、インバータの効率が含まれます。
- 性能と信頼性 – インバータ・システムの性能は、モータのトルク制御、電流センシング・ループ、モータのトルク過渡応答によって測定されます。信頼性には、パワー・モジュールの信頼性、モータの信頼性、絶縁などが含まれます。
- システム・コスト – 電気機器やワイヤ・ハーネス以外の主なコンポーネントは以下のとおりです。
  - EMI フィルタ
  - DC リンク・コンデンサ
  - バスバー
  - マイコンと制御エレクトロニクス
  - パワー・モジュールとドライブ・ステージ・エレクトロニクス
  - 電流センサ
  - インバータのハウジングと冷却

## 2 アーキテクチャとトレンド

トラクション・インバータのアーキテクチャは、車両の種類によって異なります。プラグイン・ハイブリッド電気自動車 (PHEV) とバッテリー式電気自動車 (BEV) は、3 相電圧源インバータ・トポロジを採用しており、電力レベルの範囲は 100~500kW です。バッテリー・パックは、インバータの DC 入力に直接接続することも、DC/DC 昇圧コンバータを使用してバッテリー電圧を昇圧し、DC 電圧を制御してインバータに電力を供給することもできます。

2 レベル・インバータは、電動自動車や業界で最も一般的に使用されているパワー・コンバータであり、数十キロワット〜数百キロワットの電力範囲に対応しています。通常、スイッチング周波数は 5kHz~30kHz の範囲ですが 3 レベルのインバータが一般的になりつつあります。インバータはより高い電力供給能力 (300kW を超える)、より高効率でより低い高調波歪みを実現し、より小さい電磁干渉 (EMI) フィルタを使用できるからです。多くのトポロジの中で、ニュートラル・ポイント・クランプと T タイプのニュートラル・ポイント・クランプ (TNPC) が最も競争力の高い設計です。図 2-1 に、3 レベルの TNPC インバータの例を示します。

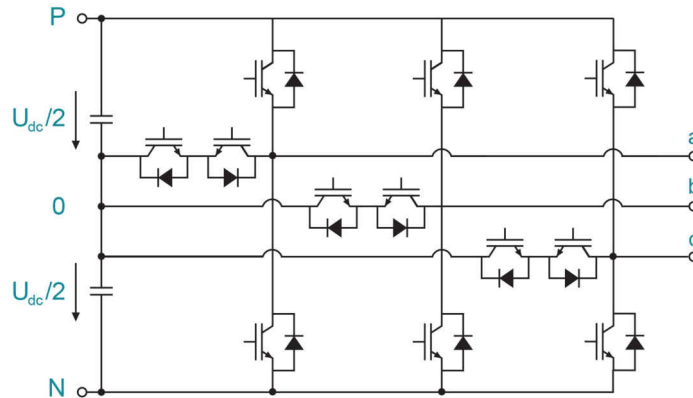


図 2-1. 3 レベル T タイプ・インバータ

2 つ目のトレンドは、デュアル・モータ・アーキテクチャです。2012 年の初めに、Tesla は 85kWh のバッテリー・パックを使用して最大 426 km の走行を実現した、後輪駆動のフルサイズ・高級セダン、モデル S を発表しました。2014 年、Tesla は、フロント軸とリア軸の両方に電動モータを搭載したモデル S の全輪駆動バージョンを発表しました。それ以来、デュアル・インバータは、Chevy Volt PHEV、Toyota Prius HEV、Cadillac CT6 PHEV などのさまざまな OEM で実装されています。

システム統合を改善する 3 番目のトレンドは、パワー・エレクトロニクス、電気モータ、トランスミッションをコンパクトなシステム・ハウジングに組み合わせた e アクスルの実装です。この設計では 20kRPM のようなより高いトルクと最高速度を達成できるため、e アクスルを使用するとモータの性能が向上します。冷却能力とコイル巻線構造の改善により、電力密度とモータ効率が向上します。

トラクション・インバータの他のトレンドの特長:

- 電力レベルと ASIL の向上 (100kW~500kW、ASIL C から ASIL D へ)
- 800V テクノロジーへの移行と、スイッチング過渡電圧の増加
- ゲート・ドライブの強度を簡単に調整でき、オーバーシュートの低減、効率の最適化、EMI の低減を実現
- リゾルバの代わりに誘導型位置センシング・テクノロジーを採用することでコストを削減
- ゲート・ドライバ IC にアクティブ放電機能を統合することで、コスト削減と省スペースを実現

### 3 トラクション・インバータを実現するための重要なテクノロジー

トラクション・インバータには、**絶縁テクノロジー**、低電圧ドメインに実装されたテクノロジー、および高電圧ドメインに実装されたテクノロジーが必要です。絶縁型ゲート・ドライバ、デジタル・アインレータ、絶縁型 A/D コンバータ、ソリッド・ステート・リレーに採用されているテキサス・インスツルメンツの容量性絶縁テクノロジーは、誘電体に二酸化ケイ素を使用する容量性回路に強化信号絶縁機能を内蔵しています。図 3-1 に、トラクション・インバータ・システムの例を示します。絶縁バリア (赤い点線) は、低電圧ドメインと高電圧ドメインを分離します。

低電圧ドメインでは、マイクロコントローラ (MCU) がパワー・スイッチにパルス幅変調 (PWM) 信号を生成します。MCU は、センシングおよび速度制御を閉ループで実行し、ホスト機能処理して必須のハードウェアおよびソフトウェアのセキュリティおよび安全なコード実行の要件を満たします。さらに安全な電源ツリーを実装することで、MCU と重要な電源レールの電力損失を防止できます。12V の車載バッテリーに接続されたパワー・マネージメント IC (PMIC) またはシステム・ベースのチップによって、MCU に電力が供給されます。MCU は、リゾルバまたはホール素子のアナログ・フロント・エンドと接続します。

高電圧ドメインの主な機能は次のとおりです。

- **パワー・スイッチ** – 通常は SiC (シリコン・カーバイド) または IGBT (絶縁型ゲート・バイポーラ・トランジスタ) ベースのパワー・モジュールで、保護機能と監視機能を備えた絶縁型ゲート・ドライバによって制御されます
- **絶縁ゲート・ドライバ** – 絶縁デバイスは、高電圧ユニットと低電圧ユニットの間でデータと電力の伝送を実現すると同時に、有害な DC 電流や制御されていない過渡電流が高電圧ドメインから流れ込む事態を防止します
- **バイアス電源** – 低電圧側から入力を受け取り、ゲート駆動電圧を電源スイッチに生成する、ガルバニック絶縁された電源です
- **絶縁型電圧 / 電流センシング** – DC リンク電圧とモータ位相電流を検出し、モータに適切なトルクが印加されていることを確認します
- **アクティブ放電** – DC バス・コンデンサの電圧を安全な電圧に放電します。逆起電力 (EMF) を生成できる種類のモータには、アクティブ放電が必要です。国際連合欧州経済委員会の 94 規則では、DC バス・コンデンサの電圧が 5 秒未満で安全な電圧 (60V) に降下することが求められています。さらに、重要な機能に対して自己テストを実行し、システム障害を防止するための診断回路も搭載されています。

インバータ制御と安全性の方法も、車両の種類によって異なります。たとえば、永久磁石同期型モータ (PMSM) は高効率、低トルク・リップル、広い速度範囲を備えているため、活用できます。PMSM は多くの場合、ペース・ベクトル PWM 制御を使用します。この制御は、フィールド指向制御とも呼ばれます。回転子の磁気に対して垂直な固定子ベクトルを生成する方法で固定子の電流を制御すると、トルクが生成されます。固定子の電流を更新すると、固定子の流束は常に回転子の磁石に対して 90 度に維持されます。PHEV および BEV で一般的に使用されている他のモータ・タイプには、誘導モータ、外部励起同期モータ、スイッチト・リアクタンス・モータなどがあります。

高価なレアアース材料である永久磁石を低減するために、外部励起同期モータ (EESM) は 2 次側の車軸だけでなく、車両の 1 次側の車軸ムーバーとして使用されることが増えています。このモータを使用する目的は、コストを削減することです。たとえば、100kW のピーク電力に必要なのは約 1.5kg の磁石であり、製造とメンテナンスの労力を削減します。

EESM マシン・タイプには、導電性 EESM と誘導性 EESM (iEESM) があります。EESM を使用した商用車両には、Toyota Prius、Chevrolet Bolt EV、Ford Focus Electric、VW e-Golf、BMW iX3 などがあります。

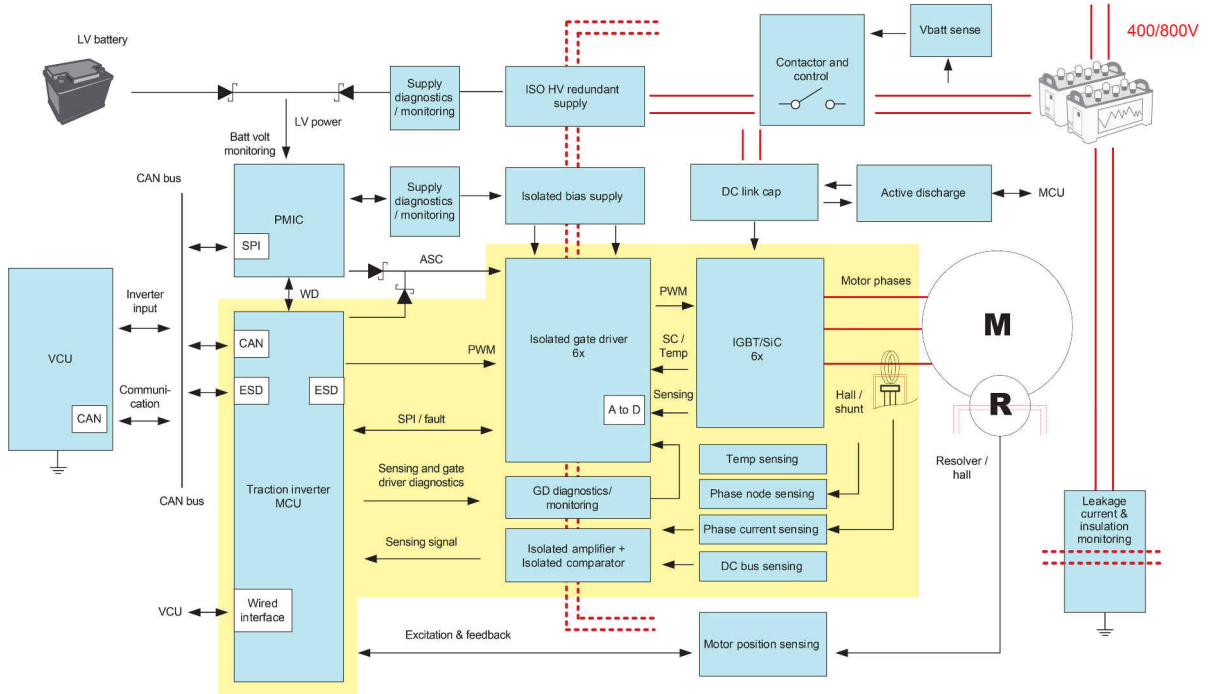


図 3-1. トラクション・インバータ・システム・ブロック図

## 4 マイコン

インバータのアーキテクチャと仕様が決まると、次のステップはマイコンの選択です。テキサス・インスツルメンツは、Arm® Cortex® R5F ベースの Sitara ファミリアや、リアルタイム制御機能と高速制御ループを備えた高性能 C2000™ マイコン・ファミリなど、HEV および EV アプリケーション向け **マイコン** の強力な製品ラインアップを提供しています。

### 4.1 Sitara ファミリ

**Sitara マイコン・ファミリ** の Arm Cortex-R5F クラスは 2 つの R5F コアを内蔵しています。コアの周囲には、L1 キャッシュと密結合メモリ (TCM) などのメモリ、標準的な Arm CoreSight™ デバッグおよびトレース・アーキテクチャ、統合型ベクタ割り込みマネージャ (VIM)、ECC アグリゲータ、その他の各種モジュールが配置されています。リアルタイム制御用アクセラレータは従来の C2000 制御モジュールを継承しています。このアクセラレータには、A/D コンバータ (ADC)、アナログ・コンパレータ、バッファ付き D/A コンバータ、拡張パルス幅変調器 (EPWM)、拡張キャプチャ、拡張直交エンコーダ・パルス、高速シリアル・インターフェイス、シグマ・デルタ・フィルタ・モジュール、クロスバーが含まれます。その他の利点は、以下のとおりです。柔軟なロックステップ・オプションによる安全デコンポジション分割、ハードウェア・セキュリティ・モジュール (HSM)、AUTOSAR による CAN-FD のサポート。図 4-1 に、AM2634-Q1 によって制御されたトラクション・インバータ・システムのブロック図を示します。

Code Composer Studio™ ソフトウェアのプロジェクト・フォルダには、トラクション・インバータのデモ・コードが含まれています。リゾルバ・ループは次のように実装されています。1 つの PWM チャネルは、ダイレクト・メモリ・アクセス経路のリゾルバ励起信号の更新と D/A コンバータ (DAC) の更新をより高い頻度でトリガするように設定されており、その他の 3 つの PWM チャネルはインバータ信号を生成し、また ADC SOC を生成します。リゾルバ励起信号は、ADC サンプルの目的位相に合わせて DAC によって調整されます。複数の ADC ユニッツが、同じシステム・オン・チップ (SOC) を共有できます。

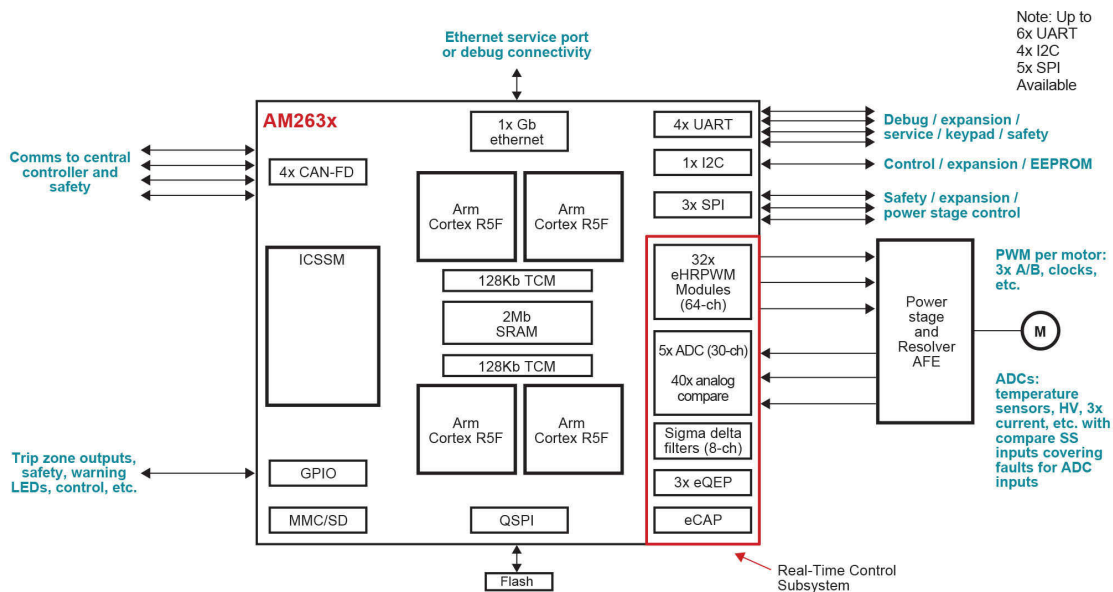


図 4-1. AM2634-Q1 を使ったトラクション・インバータ・システムのブロック図



## 4.2 リアルタイム制御マイコン

テキサス・インスツルメンツの C2000 マイコン・ファミリーは、20 年以上の間、デジタル電源およびモーター制御アプリケーションにおいて優れたリアルタイム制御性能を提供してきました。これらのマイコン (TMS320F28003x、TMS320F2837x など) はフラッシュ・メモリ、A/D コンバータ (ADC)、デジタル・シグナル・プロセッサ (DSP)、パルス幅変調 (PWM) ユニットの内蔵しており、非常に好評を博しています。C2000 ファミリーは、スタンドアロンのインバータから完全統合型パワートレインまで、幅広い品ぞろえを特長としています。これらにはトラクション・インバータ、オンボード・チャージャ (OBC)、高電圧 DC/DC コンバータ、バッテリー管理システム (BMS)、暖房 / 換気 / 空調 (HVAC) が含まれており、次期 F29x ファミリーは数 100MIPS の性能を発揮できます。

テキサス・インスツルメンツの C2000 マイコンは、トラクション・インバータの制御アルゴリズムの高速化に役立つ以下の機能を内蔵しています。

- メイン DSP コアの磁界方向制御から独立してコードを実行できるステート・マシン・ベースの 32 ビット浮動小数点制御補償器アクセラレータ
- 32 ビット浮動小数点演算または 64 ビット浮動小数点演算 (本ファミリーの一部のデバイス) のサポート
- 変換とトルク・ループ計算でよく使われる一般的な三角関数演算に対応するための固有命令を備えた三角関数算術演算ユニット (TMU)。TMU に基づく命令を使うことで、サイクル数を大幅に低減できます。図 4-2 に、トラクション・インバータ制御アルゴリズムの TMU による改善例を示します。
- 複雑な数学方程式に見られるビタビおよび巡回冗長性検査演算のサイクル数を低減

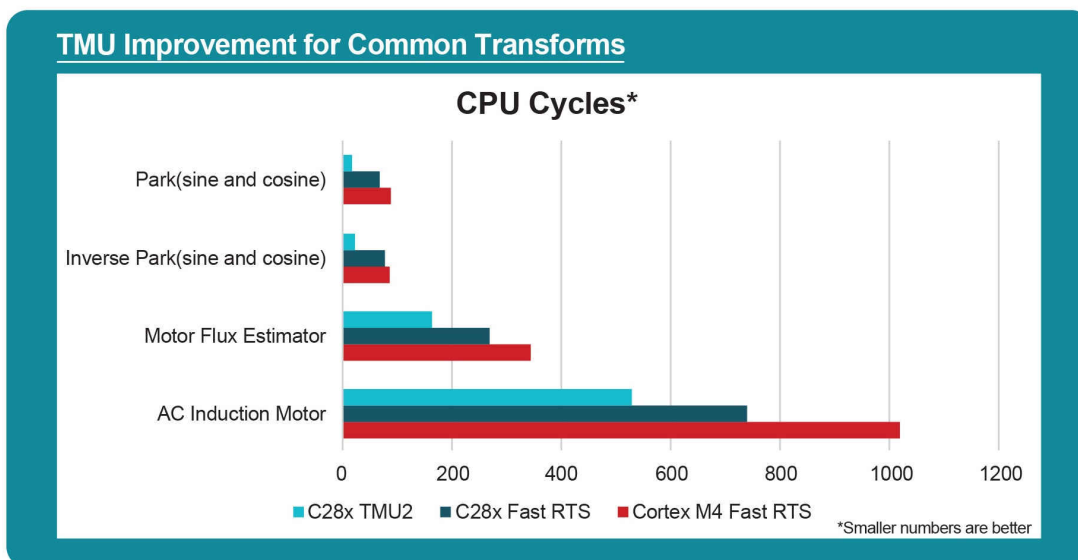


図 4-2. トラクション・インバータ制御の TMU による改善

## 5 絶縁型ゲート・ドライバ

テキサス・インスツルメンツのゲート・ドライバ絶縁は最大  $5.7\text{kV}_{\text{RMS}}$  で、感電からの保護を可能にすると同時に、より高い動作電圧、より広い沿面距離と空間距離を実現し、システムの信頼性を向上します。絶縁型ゲート・ドライバには、スマート・ドライバ UCC21750-Q1 ファミリーとセーフティ・ドライバ UCC5870-Q1 ファミリーの 2 つの主要なファミリーがあります。

UCC21750-Q1 ファミリーには、高速過電流および短絡検出、シャント電流センシングのサポート、フォルト報告、アクティブ・ミラー・クランプ、入力および出力側電源の低電圧誤動作防止検出など、トラクション・インバータのパワー・モジュール用の保護機能が搭載されています。絶縁型のアナログから PWM へのセンサにより、温度または電圧のセンシングが容易になります。

UCC5870-Q1 ドライバ・ファミリーの主な機能は次のとおりです。

- 機能安全に準拠した絶縁型シングル・チャンネル・ゲート・ドライバで、最大  $1\text{kV}_{\text{RMS}}$  の動作電圧と 40 年を超える絶縁バリア寿命をサポートし、部品間スキューを低減し、 $100\text{V/ns}$  を超える同相ノイズ耐性 (CMTI) を実現
- 30A の高いピーク・ドライブ強度により電力スイッチング損失を最小化し、ドライブ回路のバッファ回路を取り除くことでコストを削減
- パワー・モジュールの温度を監視し、特定の温度制限までの動作を可能にする温度センサにより、広い動作範囲をサポート
- ミラー・クランプにより誤ターンオンを防止し、効率目標を達成するために必要な速度でスイッチを切り替えることが可能

図 5-1 および図 5-2 に、UCC5870-Q1 の 30A のドライブ強度と、以下のテスト条件での競合デバイスを示します。

- VCC2-Vee2 = 23V
- $R_{\text{gon}} = R_{\text{goff}} = 0\Omega$
- 負荷容量 =  $1\mu\text{F}$

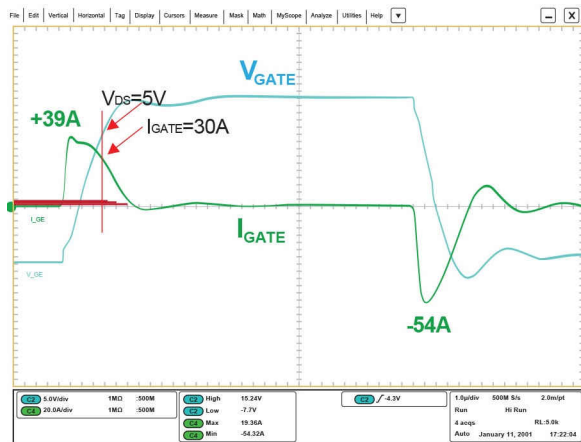


図 5-1. UCC5870-Q1 のゲート・ドライブ強度

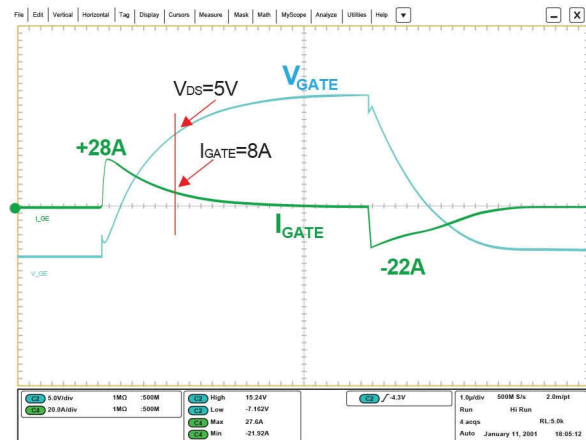


図 5-2. 競合デバイスのゲート・ドライブ強度

トラクション・インバータの効率を改善し、EMI を低減する 1 つの方法は、ゲート・ドライブ出力を調整してスルーレートを制御することです。その結果、温度、負荷、電圧などのさまざまな条件でスイッチング速度が変化します。たとえば、バッテリー電圧を消耗する場合、過渡電圧 ( $dv/dt$ ) は自然に小さくなり、ゲート・ドライブ出力を調整してスイッチをより高速に遷移させることができます。



図 5-3 および図 5-4 に、UCC5870-Q1 に基づく可変ゲート・ドライブの実装を示します。図 5-3 に設計図を示し、図 5-4 に WolfSpeed 社の XM3 ハーフ・ブリッジ・パワー・モジュール・ファミリに接続されている設計ボードを示します。

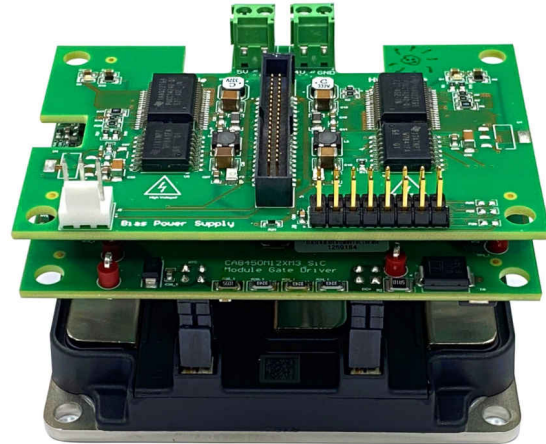
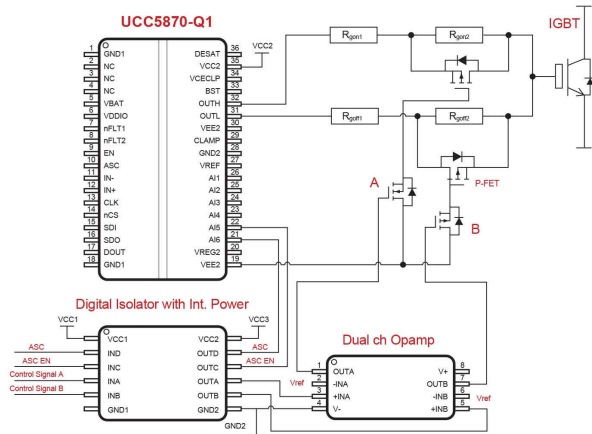


図 5-3. UCC5870-Q1 可変ゲート・ドライブ実装の設計図 図 5-4. UCC5870-Q1 可変ゲート・ドライブ実装の設計ボード

図 5-5 および図 5-6 に、ダブル・パルス・テスト波形を示します。立ち上がりエッジの平均スイッチング  $dv/dt$  速度が  $4.6\text{kV}/\mu\text{s}$  から  $21\text{kV}/\mu\text{s}$  に増加しました。立ち下がりエッジの平均スイッチング  $dv/dt$  速度が  $3.8\text{kV}/\mu\text{s}$  から  $13.5\text{kV}/\mu\text{s}$  に増加しました。

以下の両方の画像は、 $800\text{V}$  バスの下でダブル・パルス・テスト波形を使用して収集したものです。

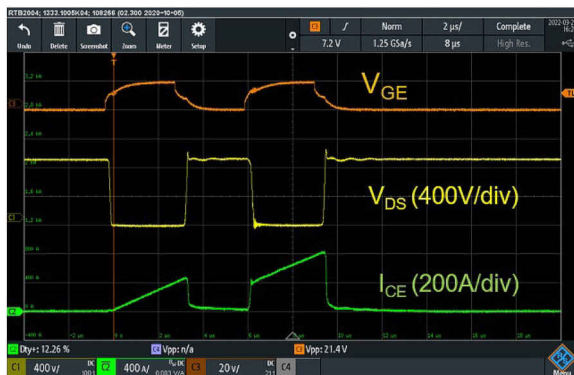


図 5-5.  $5.5\Omega$  のゲート抵抗による弱い駆動



図 5-6.  $0.5\Omega$  のゲート抵抗による強い駆動

表 5-1 に、 $400\text{V}$  のバス電圧下での、弱い駆動電流 ( $5.5\Omega$  のゲート抵抗) と強い駆動電流 ( $0.5\Omega$  のゲート抵抗) の間のスイッチング・エネルギーの比較を示します。

表 5-1.  $400\text{V}$  バス電圧でのスイッチング・エネルギーの比較

| パラメータ                                | 弱い駆動<br>( $5.5\Omega$ のゲート抵抗) | 強い駆動<br>( $0.5\Omega$ のゲート抵抗) |
|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| ドレイン - ソース間電圧                        | $400\text{V}$                 | $400\text{V}$                 |
| ドレイン - ソース間電流                        | $200\text{A}$                 | $200\text{A}$                 |
| ターンオン・エネルギー                          | $2.364\text{mJ}$              | $893\mu\text{J}$              |
| ターンオフ・エネルギー                          | $2.12\text{mJ}$               | $898\mu\text{J}$              |
| ドレイン - ソース間電圧 ( $V_{DS}$ ) のオーバーシュート | $88\text{V}$                  | $150\text{V}$                 |

表 5-2 に、800V バス電圧での、弱い駆動電流と強い駆動電流の間のスイッチング・エネルギーの比較を示します。

**表 5-2. 800V バス電圧でのスイッチング・エネルギーの比較**

| パラメータ                                | 弱い駆動<br>(5.5Ω のゲート抵抗) | 強い駆動<br>(0.5Ω のゲート抵抗) |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| ドレイン - ソース間電圧                        | 800V                  | 800V                  |
| ドレイン - ソース間電流                        | 400A                  | 400A                  |
| ターンオン・エネルギー                          | 2.03mJ                | 1.124mJ               |
| ターンオフ・エネルギー                          | 2.0mJ                 | 1.245mJ               |
| ドレイン - ソース間電圧 ( $V_{DS}$ ) のオーバーシュート | 120V                  | 230V                  |

## 6 低電圧バイアス電源

トラクション・インバータにおいて、**低電圧バイアス電源**は通常、12V バッテリなどの低電圧電源に接続され、ゲート・ドライバに電力を供給します。テキサス・インスツルメンツは、内蔵電界効果トランジスタ (FET) と内蔵磁気部品を使うコンバータ、内蔵 FET と外部磁気部品を使うコンバータ、外部 FET と外部磁気部品を使うコントローラなど、各種ソリューションを提供しています。

UCC14240-Q1 絶縁型 DC/DC コンバータ・モジュールは、105°C の周囲温度で 1.5W の出力電力を供給し、 $\pm 1.3\%$  の出力電圧レギュレーションを実現します。本デバイスには基本絶縁バージョンと強化絶縁バージョンがあり、150V/ns を超える同相過渡耐性を備えています。図 6-1 に、UCC14240-Q1 の EVM ボードの画像を示します。UCC14240-Q1 は薄型、3.5mm ワイド・ボディ SOIC パッケージで供給されます。

UCC25800-Q1 デバイスは、超低 EMI 放射のインダクタ - インダクタ - コンデンサ共振型コンバータです。このデバイスを使うと、漏れインダクタンスは大きいですが 1 次側と 2 次側の間の寄生静電容量が非常に小さいトランスと、調整可能な過電流保護、入力過電圧保護、過熱保護、ピン・フォルト保護などの保護機能を利用した設計が可能です。

SN6507-Q1 は、MOSFET を内蔵し、広い入力電圧範囲を実現するデューティ・サイクル制御機能を備えた高周波プッシュプル・トランス・ドライバです。このデバイスは、コントローラと、スイッチングする位相が異なる 2 つの 0.5A NMOS パワー・スイッチとを内蔵しています。このデバイスは、プログラマブル・ソフトスタート、スペクトラム拡散クロック、ピンで構成可能なスルーレート制御機能も備えています。

LM2518x-Q1 ファミリーは、パワー・スイッチを内蔵し、かつ 4.5V~42V の広い入力電圧範囲にわたって動作できる 1 次側レギュレーション (PSR) フライバック・コンバータです。絶縁出力電圧を 1 次側フライバック電圧からサンプリングするため、出力電圧のレギュレーションのためのフォトカプラ、基準電圧、トランスからの 3 次巻線は不要です。境界導通モード (BCM) スwitchングにより、小型の磁気的設計と、 $\pm 1.5\%$  以内の負荷およびライン・レギュレーション性能を実現できます。

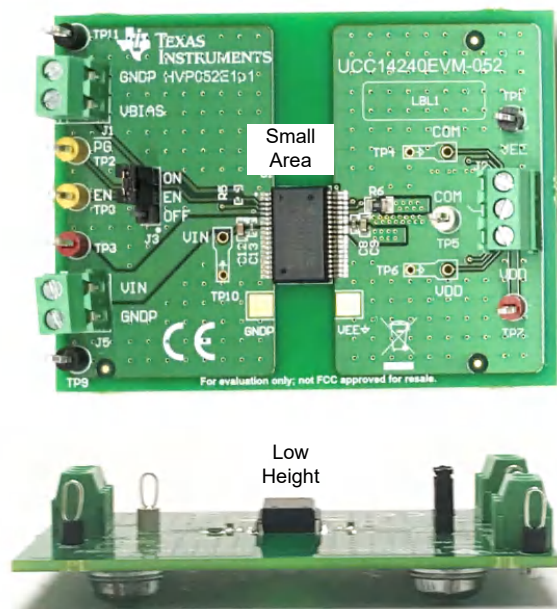


図 6-1. UCC14240-Q1 の EVM ボード

## 7 高電圧バイアス、冗長電源

トラクション・インバータ・システムは多くの場合、高電圧電源を必要とします。この電源は高電圧バッテリーからの電力を変換し、低電圧側に接続することで、冗長な電力バスを作成し安全性を向上させます。この高電圧電源は、入力電圧が 50V まで低下したときに起動する必要があり、800V バッテリーで最大 1kV を駆動する必要もあります。車両の事故が発生した後、またはトラクション・インバータの誤動作によって高電圧バッテリーが分離された場合、低いスタートアップ電圧が発生する可能性があります。モータは回転を開始し、ジェネレータのように動作します。このジェネレータは、制御されていない電圧を DC バスに誘導します。電圧が 50V を超えないように電圧を制御するには (タッチ・セーフ)、補助電源をオンにして安全関連回路に電源を投入する必要があります。この回路は DC リンク・コンデンサを放電 (アクティブ放電) するか、モータをアクティブに短絡させることができます。

この要件を満たすために、テキサス・インスツルメンツはさまざまなリファレンス・デザインを提供しています。

1. テキサス・インスツルメンツ、『[UCC28C5y-Q1 EVM: 40V~1kV 入力、15V 出口、40W PSR フライバック](#)』
2. テキサス・インスツルメンツ、『[TIDA-01505 – 回生ブレーキのテストをサポートする車載用 40V~1kV 入力フライバックのリファレンス・デザイン](#)』
3. テキサス・インスツルメンツ、『[PMP22288 – 車載インバータ電源向け 15W フライバックのリファレンス・デザイン](#)』
4. テキサス・インスツルメンツ、『[PMP10200 – 超広範囲入力電圧 PSR フライバック・コンバータのリファレンス・デザイン](#)』

## 8 DC リンク・アクティブ放電

すべての EV トラクション・インバータは、セーフティ・クリティカルな機能として DC リンクのアクティブ放電が必要です。放電回路は、以下の条件および要件の下で DC リンク・コンデンサのエネルギーを放電するために必要です。

- 緊急時または修理時に、システム内の電圧が 2 秒未満で安全に接触できるようにする必要があります
- 車両のキーオフ時に、DC リンク・コンデンサを放電したままにする必要があります
- システム・レベルの安全性要件: ASIL D
- MCU に障害が発生した場合でも、MCU から独立して動作できるようにする必要があります

テキサス・インスツルメンツには、さまざまなシステム・レベル要件をターゲットとした、複数のアクティブ放電設計があります。

- [TPSI3050-Q1](#) を使用したパワー・トランジスタのオン/オフ制御。TPSI3050-Q1 強化絶縁型スイッチ・ドライバには 10V のゲート電源が内蔵されており、2 次バイアス電源を必要とせずに放電パワー・スイッチを駆動できます。

- AFE539F1-Q1 デバイスを使用して PWM を制御。AFE539F1-Q1 スマート AFE には、PWM およびカスタム波形ジェネレータ用の不揮発性メモリが内蔵されています。このデバイスにはプログラマビリティとロジックが追加されているため、DAC ベースの回路、MCU ベースの回路、および完全にディスクリートの回路間のギャップを埋めるソフトウェアが不要になります。図 8-1 および図 8-2 に、設計ブロック図とテスト波形を示します。

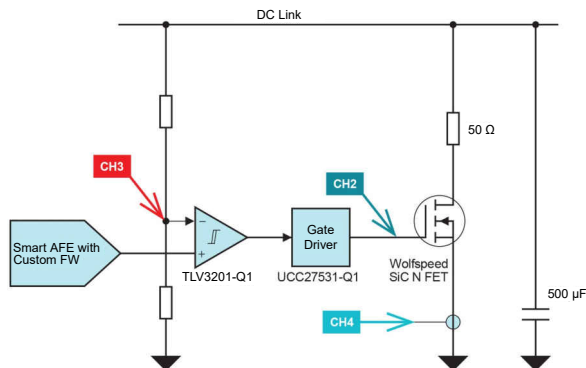
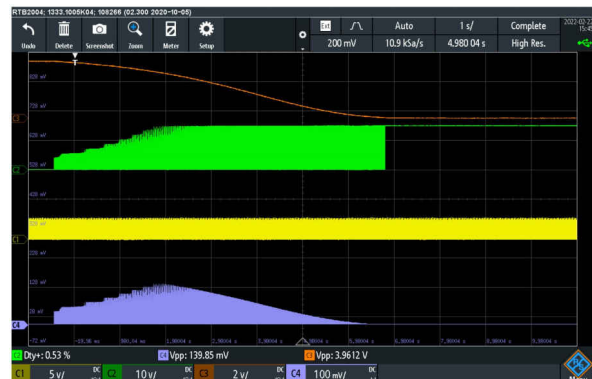


図 8-1. スマート AFE に基づく DC リンク・アクティブ放電



- CH1: AFE539F1-Q1 出力
- CH2: ゲート・ドライバ (UCC27531-Q1) PWM 出力
- CH3: 抵抗分圧器の後の DC リンク電圧
- CH4: SiC FET のドレイン - ソース間電流

図 8-2. テスト波形

- パワー・モジュールでリニア・バイアスまたは PWM ベースのパルス・リニア・スイッチングを実行して電力段を放電し、短絡を形成します。トライステート機能を備えたテキサス・インスツルメンツの絶縁型ゲート・ドライバは、ディスクリート・アナログ回路を使用してパワー・モジュール経由でアクティブ放電を実現します。放電プロファイルは、コンデンサの両端にある電流源基準にミラーリングされます。この場合、100µA の定電流シンクが 1A の定電流放電を表します。ゲート電圧レギュレータはゲート - ソース間電圧を制御し、パワー・モジュールをリニア領域で駆動します。
- モータ巻線を通るエネルギー放電。巻線ベースの放電を複数の段に分割することが可能です。これらの段には、急速放電段またはバス電圧レギュレーション段があります。大きな d 軸電流を生成すると、DC リンクのエネルギーが迅速に減少しますが、q 軸電流はゼロである必要があります。テキサス・インスツルメンツの Sitara または C2000 マイコンによる高速ループ制御と安全性絶縁型ゲート・ドライバには、シリアル・ペリフェラル・インターフェイス (SPI) のプログラマビリティが含まれており、6 つの ADC チャンネルにより信頼性が高く、スムーズに放電を制御します。

## 9 モーターの位置センシング

モーターの回転子の位置センサは、回転子シャフトの角度位置を測定します。モーター位置センサは、EV アプリケーションの安全要件を満たす速度帰還ループ制御にとって非常に重要です。位置制御のために、これらのセンサは既知の (安全な) 位置、モーター速度、動作中の位置を有効にし、トルク制御ループへの帰還も行います。

可変リアクタンス型リゾルバ・センサは、回転するトランスの動作原理を実装しています。このトランスは 1 つの 1 次巻線と、互いに直交する 2 つの 2 次巻線を持っています。1 次巻線に励起電圧 ( $V_{EXC}$ 。テキサス・インスツルメンツの [ALM2403-Q1](#) または [TAS5431-Q1](#) などの励起アンプによって生成されます) を印加すると、磁束 ( $\Phi$ ) を発生させる電流が流れます。この磁束は、回転子の角度 ( $\Theta$ ) に応じて 2 次巻線の中を通過して分布し、それに基づいて  $V_{SIN}$  と  $V_{CO}$  を誘導します。帰還信号は、ADC のために差動信号からシングルエンド出力に変換されます。セーフティ・マイコンは、リゾルバの 2 次巻線の電圧比から  $\Theta$  を計算します。

これらの誘導型位置センサには、高速モーター位置検出に使えるマグネット・フリー技術が実装されています。これらのセンサは渦電流の原理を使用して、一連のコイルの上を移動する金属製ターゲットの位置を検出します。位置センサ・インターフェイス IC は、RX コイルからの入力信号を差動サインおよびコサイン出力信号に変換します。これらの出力信号は、マイコンによって処理されます。



## 10 絶縁型電圧 / 電流センシング

トラクション・インバータ・システムは**絶縁型センサ**を使用して、DC リンク電圧やモータ位相電流などの電圧と電流を測定します。テキサス・インスツルメンツの **AMC1311B-Q1** および **AMC1351-Q1** 絶縁型アンプおよび **AMC1305-Q1** 絶縁型変調器ベースの設計は、絶縁型電流および電圧センシングで高精度、高帯域幅、低レイテンシ、および低温度ドリフトを実現するのに役立ちます。この製品ファミリーは、基本絶縁定格と強化絶縁定格の両方を提供します。二酸化ケイ素ベースの容量性絶縁バリアは、高いレベルの磁界耐性をサポートします。

## 11 システム・エンジニアリングとリファレンス・デザイン

テキサス・インスツルメンツのシステム・エンジニアリング・チームは、テキサス・インスツルメンツの幅広い製品ラインアップによる最適化システム設計の開発に取り組んでおり、それによってお客様がシステム設計サイクルを短縮できるように支援しています。以前に開発されたリファレンス・デザインの一部を以下に示します。

- **TIDM-02009:**

TIDM-02009 は、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・デザインです。

このリファレンス・デザインでは、1 つの TMS320F28388D リアルタイム C2000 マイコンを使って HEV または EV (ハイブリッド車または電気自動車) のトラクション・インバータと双方向 DC/DC コンバータを制御する方法を示します。トラクション制御機能はソフトウェアベースのリゾルバ / デジタル・コンバータ (RDC) を使用し、最高 20,000RPM に達する高速でモーターを駆動します。DC/DC コンバータは、位相シフト・フルブリッジ (PSFB) トポロジーと同期整流 (SR) 方式を採用したピーク電流モード制御 (PCMC) 手法を使用します。トラクション・インバータ段は、UCC5870-Q1 スマート・ゲート・デバイスで駆動する SiC (シリコン・カーバイド) 電力段を使用します。PCMC の波形を生成するために、最新の PWM モジュールと、コンパレータ・サブシステム (CMPSS) が内蔵しているスロープ補償機能を使用しています。ASIL デコンポジションに基づくシステム機能安全コンセプトは TÜV SÜD によって評価され、代表的な安全性目標として ISO 26262 ASIL D までのシステム・レベル安全インテグリティが証明されています。

- **PMP22817:**

PMP22817 は、車載対応の、SPI プログラマブル・ゲート・ドライバとトランス内蔵バイアス電源のリファレンス・デザインです。

このリファレンス・デザインは、トラクション・インバータ内のパワー・スイッチを想定した絶縁型バイアス電源と絶縁型ゲート・ドライバを実現します。バイアス電源とドライバの両方が、800VDC バス・アプリケーションが必要とする高い絶縁能力を達成しています。絶縁型バイアスは 24VDC を生成するほか、+15V と -5V 両方のゲート駆動バイアスを供給します。この絶縁型ドライバは、このような大電力スイッチのオン / オフを迅速に切り替えるために必要な大電流を供給するほか、複数の高度な保護機能を搭載しています。また、PMP22817 リファレンス・デザインは、車載バッテリーのバッテリー電圧 (サージ / 降下を含め 6V~42V) に直結可能なテスト済みの DC/DC シングルエンド 1 次側インダクタ・コンバータ SEPIC を実現し、レギュレーション済みの 24V を供給することもできます。

- **TIDA-01527**

TIDA-01527 は、C2000™ マイコンを使って  $\pm 0.1^\circ$  の精度を実現するディスクリット・リゾルバ・フロントエンドのリファレンス・デザインです。

このリファレンス・デザインは、リゾルバ・センサ用の励起アンプおよびアナログ・フロント・エンドです。このデザインは、ディスクリット部品と標準的なオペアンプのみを 1 平方インチ (6.45 平方 cm) のプリント基板 (PCB) に実装しています。公開されているアルゴリズムとサンプル・コードは、信号処理と角度計算の目的で、C2000 マイコン (MCU) LaunchPad™ 開発キットと TMS320F28069M マイコンの組み合わせを使用しています。このリファレンス・デザインは、優れた散乱信号処理方式を使用しています。この方式によりシステム精度が 250% も向上し、同時にハードウェアのコストと複雑性を妥当なレベルに抑えられます。

## 12 まとめ

車載用トラクション・インバータは、800V テクノロジー、高い電力密度 (50kW/L 超への移行)、高効率 (99% 超)、高い安全性 (ASIL D) 要件がトレンドです。MCU、絶縁型ゲート・ドライバ、絶縁型バイアス電源、セーフティ PMIC、アクティブ放電、位置センシング、絶縁型電圧、電流センシング などのテキサス・インスツルメンツのテクノロジーとデバイスは、信頼性とコストを改善した高性能で安全なトラクション・インバータ・システムの実現に役立ちます。

## 13 関連資料

ソフトウェア・ベンチマークを含めて、C2000 がリアルタイム・シグナル・チェーンにもたらす利点の詳細については、[『C2000™ 制御マイコンの最適化シグナル・チェーンのリアルタイム・ベンチマーク』アプリケーション・ノート](#)を参照してください。

スマート AFE の詳細については、技術記事「[スマート DAC とは？](#)」を参照してください。

[『高信頼性と手ごろな価格を両立させた絶縁技術による高電圧設計課題への対応』](#)ホワイト・ペーパーを参照してください。



## 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](http://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