



Ivana Santrac and Hannes Schmid

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。このドキュメントでは、トラクション インバータを実現するために使用される個別のデバイスについて取り上げており、組込み処理、パワー マネージメント、ゲートドライブ、検出、高電圧ドメインおよび低電圧ドメインテクノロジーを含みます。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テキサス インストルメンツのリファレンス デザインに焦点を当てています。

目次

1 はじめに.....	3
2 アーキテクチャとトレンド.....	4
2.1 2 レベルと 3 レベルのインバータ.....	4
2.2 e アクスルと X-in-1 アーキテクチャ.....	5
2.3 トラクション インバータ設計の他のトレンド.....	6
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.....	8
4 マイコンとパワー マネージメント IC.....	9
4.1 C2000™ ファミリー.....	9
4.2 パワー マネージメント IC.....	10
5 絶縁型ゲートドライバ.....	11
6 低電圧絶縁型バイアス電源.....	14
7 高電圧絶縁型バイアス電源.....	16
8 DC リンク アクティブ放電.....	16
9 モーターの位置センシング.....	18
10 絶縁型電圧 / 電流センシング.....	19
10.1 絶縁型電流検出.....	19
10.2 絶縁電圧検出.....	20
11 システム エンジニアリングとリファレンス デザイン.....	21
12 まとめ.....	23
13 参考資料.....	23

図の一覧

図 2-1. 追加の T レッグ スイッチを備えた 3 レベル T 型トラクション インバータ.....	4
図 2-2. 3 レベル設計 (上) と 2 レベル設計 (下) の電圧出力波形.....	5
図 2-3. EESM トラクション インバータのシステム図.....	7
図 3-1. トラクション インバータ システム ブロック図.....	8
図 4-1. 競合製品と比較した TI の C29 マイコン ファミリーのリアルタイム制御性能.....	10
図 4-2. TPS65386x-Q1 PMIC の代表的なアプリケーション図.....	11
図 5-1. ゲートドライブの強弱の比較と、損失やオーバーシュートに及ぼす影響.....	12
図 5-2. プログラム可能 ゲートドライバの複合型駆動出力.....	12
図 5-3. プログラム可能な駆動強度アプリケーションの例.....	13
図 5-4. トラクション インバータにおける可変絶縁ゲートドライブ用 UCC5880-Q1 評価基板.....	14
図 6-1. 低電圧バイアス電源アーキテクチャ.....	14
図 6-2. 絶縁型バイアス電源の一般的なトポロジ.....	15
図 6-3. コンバータ モジュール (完全分散型) とフライバック (半分散型) のシステム設計のサイズ比較.....	15
図 8-1. スマート AFE に基づく DC リンクアクティブ放電 (左) とテスト波形 (右).....	17

図 9-1. モーター回転角度を取得するための励起コイル L_{EXC} および 2 次コイル $L_{SEC1/2}$ を備えたレゾルバ構造.....	18
図 9-2. LCD5072-Q1 を使用した誘導性検出の図.....	18
図 10-1. TMCS2100-Q1 の物理セットアップ.....	19
図 10-2. AMC0380D-Q1 のブロック図.....	21
図 10-3. 抵抗デバイダを TI の AMC038x-Q1 ファミリーに内蔵することでシステム面積を削減.....	21
図 11-1. TIDM-02014 トラクション インバータのリファレンス デザイン.....	22

表の一覧

表 2-1. 電動パワートレインにおける部品統合のさまざまなレベル.....	6
表 2-2. X-in-1 統合の設計手法.....	6
表 7-1. 高電圧絶縁型バイアス電源のトポロジをサポートする TI の各種デバイス.....	16
表 10-1. トラクション インバータにおける電流検出のさまざまな方法.....	19

商標

Prius™ is a trademark of Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha.

Bolt EV™ is a trademark of General Motors LLC.

Focus Electric™ is a trademark of Ford Motor Company.

e-Golf™ is a trademark of Volkswagen Aktiengesellschaft.

iX3™ is a trademark of Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft.

C2000™, Sitara™, and LaunchPad™ are trademarks of Texas Instruments.

Toyota® is a registered trademark of Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha.

Chevrolet® is a registered trademark of General Motors LLC.

Ford® is a registered trademark of Ford Motor Company.

VW® is a registered trademark of Volkswagen Aktiengesellschaft.

BMW® is a registered trademark of Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft.

Wolfspeed® is a registered trademark of Wolfspeed, Inc.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

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 インバータは、バッテリーまたはジェネレータ (ハイブリッド車の場合) 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ー (PMSM)、誘導モーター (IM)、外部励起同期モーター (EESM)、スイッチトリラクタンس モーター (SRM) などのトラクションドライブ モーターに電力を供給することで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。

- 機能安全およびセキュリティ – 機能安全設計は通常、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、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 – 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には、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があります。米国エネルギー省 (DOE) とオークリッジ国立研究所によると、米国市場の OEM 向けに設定されたインバータ電力密度の目標 100kW/L は 2025 年までに達成されています。SiC を使用すると、800V 以上の DC バスを実現し、電流定格を低減するとともに配線ハーネスの簡素化ができます。
- 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、モーターのトルク制御によって測定されます。このトルク制御には、電流検出ループ、モーターのトルク過渡応答が含まれます。信頼性には、パワー モジュールの信頼性、モーターの信頼性、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。
 - 機構: インバータのハウジングと冷却、バスバー
 - パワー モジュール
 - EMI フィルタ
 - DC リンク コンデンサ
 - マイコンと制御エレクトロニクス
 - ゲートドライバ
 - 電力変換
 - アクティブ放電回路
 - モーター位置センサ
 - 電流センサと電圧センサ
 - 通信インターフェイス

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、自動車を駆動するために 3 相電圧源トラクション 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 100kW ~ 500kW です。シングル アクスルドライブはここでは標準オプション (前輪または後輪) ですが、2 番目のアクスルに 2 番目のトラクション インバータと eMotor を追加することは、いわゆるデュアルモーター アーキテクチャを構築するための一般的なオプションになります。また、PHEV では、燃焼エンジンの始動に使用され、場合によっては車の駆動にも使用される統合型スタータ ジェネレータ (ISG) に、別のインバータ構造が備わっています。

バッテリーパックとトラクション インバータの間に DC リンク コンデンサを配置し、制御された DC 電圧をインバータに供給します。このコンデンサは、高周波電流に対して低インピーダンス パスを提供すると同時に、低リップル電圧を維持するエネルギー蓄積も行います。この DC リンク コンデンサは、シャットダウン、誤動作、または事故の場合には、緊急対応者が車両を安全に扱えるように、迅速に放電する必要があります。このため、トラクション インバータの主要な機能の 1 つとして DC リンク アクティブ放電が備わっています。

場合によっては、DC リンク コンデンサに接続する前に、DC/DC 昇圧コンバータを使ってバッテリー電圧を昇圧することもできます。これは、主にハイブリッド電気自動車など、バッテリー電圧レベルが低い車両に使用されます。このような低電圧 (100V 以上) でトラクション インバータに電力出力を供給すると、配線に大電流が流れますが、DC/DC 昇圧コンバータの出力で電圧レベルを 400V 以上に上げることで、これらの電流を低減できます。さらに、DC/DC 昇圧コンバータにより DC リンク電圧が安定化し、スケーラブルなバッテリー アーキテクチャが可能になります。ただし、コンバータによってシステムのコスト、サイズ、重量が増加し、変換損失が発生する可能性があります。

2.1.2 レベルと 3 レベルのインバータ

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トラクション インバータトポロジであり、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。2 レベル インバータには 2 つの電圧レベル (DC+ と DC-) があり、6 つの個別スイッチが AC 信号を生成して、相の向きに応じて固定子巻線に給電します。通常、スイッチング周波数の範囲は 5kHz ~ 30kHz です。

この設計で改善できる可能性の 1 つが 3 レベル インバータです。このインバータは、効率が大幅に高く、高調波歪みが小さいほか、より小型の電磁干渉 (EMI) フィルタを使用できます。3 レベル T 型インバータでは、既存のスイッチの間に別のレッグ (T レッグ) を追加することにより、システムがインバータ段 DC/2 に 3 番目の電圧レベルを供給できます (図 2-1 を参照)。

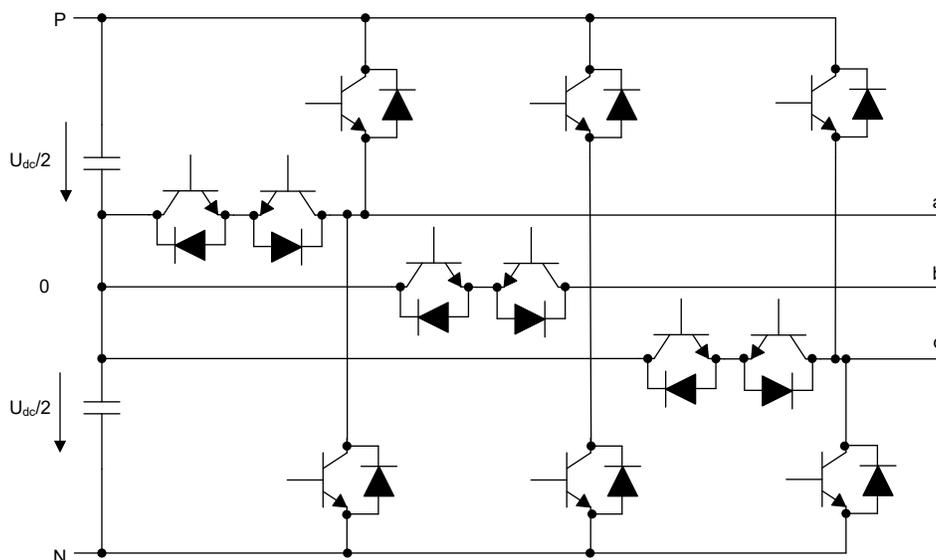


図 2-1. 追加の T レッグ スイッチを備えた 3 レベル T 型トラクション インバータ

図 2-2 に示すように、3 レベル T 型インバータに供給される 3 番目の電圧レベルによって、出力電圧の正弦波が改善されます。また、第 3 レベルの電圧レベルでは、第 3 高調波歪み (THD) も大幅に低減されます。組み合わせることで、システムの主な損失となるモーターの電力損失が低減されます。

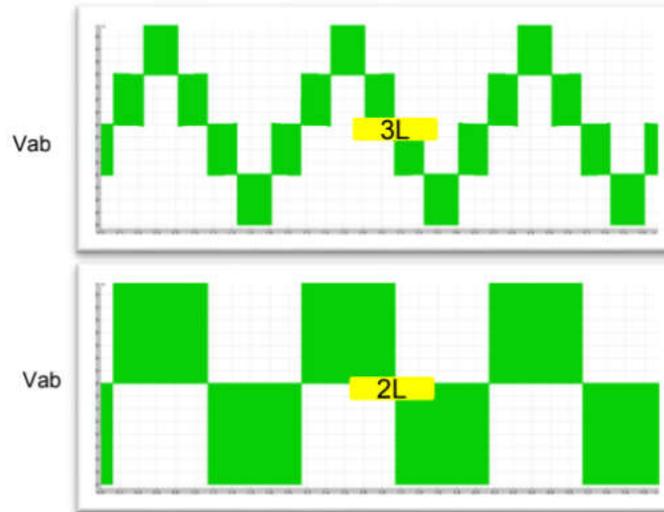


図 2-2. 3 レベル設計 (上) と 2 レベル設計 (下) の電圧出力波形

システムのコスト性能比をさらに向上させるために、3 レベル T 型インバータを、さまざまな負荷条件の下で 2 レベルと 3 レベルの制御の組み合わせとして駆動できます。この設定では、T レッグ スイッチは軽負荷条件下でのみ有効になるため、電流定格を低く抑えることができ、システムの総コスト削減が期待できます。高負荷条件下では、システムは通常どおり 2 レベルで動作します。

2.2 e アクスルと X-in-1 アーキテクチャ

システムレベルの統合を改善する一例として、パワー エレクトロニクス、電気モーター、トランスミッションを 1 つのハウジングに組み合わせた e アクスルの実装があります。e アクスルは、より高いトルクと最高速度を実現することでモーターの性能を向上させます。また、冷却能力とコイル巻線構造の改善により、電力密度とモーター効率が向上します。e アクスルは現在すでに一般的に使用されており、フロントとリアの両方のアクスルドライブ、およびデュアル モーター車両に搭載されています。

統合は電動パワートレインの追加部品へと拡張できます。この結果、X-in-1 システム統合というトレンドが進んでいます。これは、より多くのパワートレイン部品を組み合わせ、サイズ、コスト、効率、重量の改善につなげるものです。X-in-1 設計には、標準的な組み合わせはありません。一般に、表 2-1 の部品を最大 12-in-1 レベルまで組み合わせることができます。

表 2-1. 電動パワートレインにおける部品統合のさまざまなレベル

部品	X-in-1 設計名		
E モーター	3-in-1 (e アクスル)	6-in-1	8-in-1
反転			
ギアボックス			
オンボード充電器 (OBC)	12-in-1		
HV DC/DC コンバータ			
パワー ディストリビューション ユニット (PDU)			
車両制御ユニット (VCU)			
バッテリー管理システム (BMS)			
スタータ ジェネレータ			
インテリジェント昇圧モジュール			
熱管理			
正温度係数 (PTC)			

これらの X-in-1 レベルのいずれにおいても、一般に、以下の 3 種類の手法があります (表 2-2 を参照)。

1. 筐体内の X-in-1: さまざまなコンポーネント基板を 1 つの筐体に統合します。
2. 基板上的 X-in-1: 機能を 1 つの基板に統合します。
3. デバイス内の X-in-1: 機能を 1 つのマイコンに統合。

表 2-2. X-in-1 統合の設計手法

統合要素	単一筐体	単一基板	単一チップ
スケーラビリティ	高 – 各機能に特定の PCB がある	スケーラビリティが低い	
負荷共有	負荷が少ない – 各マイコンは過負荷なくリアルタイム タスクに集中	複数のマイコン間で作業を共有	負荷が高い – マイコンは多くのリアルタイム タスクを同時に処理
安全	常に確保する必要がある		
可用性	独立した動作	単一基板設計と単一チップ設計の中間	共通コンポーネント (マイコン、PMIC など) に故障が発生した場合、可用性なし
レイアウト	レイアウトが容易		レイアウトが困難。熱、EMC に関する懸念がある
ソフトウェア	複雑度が低い		複雑度が高い
熱	複数のスポットで熱を分散		単一の熱スポットのため、アクティブな冷却が必要な場合がある
リソース	さまざまなプロセッサ コンポーネントを使用してスケーラビリティを確保	カスケード接続設計が必要	
通信	ケーブル、コネクタ、PHY が必要	ケーブル、コネクタ、PHY は不要	
リソースの拡張	GPIO エクスパンダは不要	GPIO エクスパンダが必要な場合がある	固定されたリソースおよびピン数のため、追加のロジックが必要な場合がある
設計重量	重い – 複数の基板と配線による	軽い	
設計サイズ	最大の体積 (基板積層構成)	高さを低く抑えた単一基板設計	

8-in-1 アーキテクチャは、2025 年に市場の主流となりました。2030 年以降は、12-in-1 統合が、より低機能な 6-in-1 統合バージョンと並んで、大きなシェアを占めると予想されています。現在、統合は主に中国によって推進されています。

2.3 トラクション インバータ設計の他のトレンド

トラクション インバータ設計では、他にも注目すべきトレンドがあります。これらのトレンドの一部を以下に示します。

- 電力レベルと自動車安全性水準の向上 (例: 100kW から 500kW へ、ASIL C から ASIL D へ)
- 800V 以上を使用する技術への移行に伴い、スイッチング過渡電圧が増加 (2025 年時点で、900V の自動車はすでに入手可能)

- 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、効率の向上を実現
- コスト削減の可能性を考慮し、レゾルバの代わりに誘導型位置検出テクノロジーを採用
- システムの複雑さを軽減するため、U-shield デバイスからマルチセンサ コアレス (TMCS2100-Q1) デバイスまで、コアレス電流検出の選択肢を採用
- 外部励起同期機構 (EESM、[図 2-3](#) を参照) を介してレアアース材料を使用しないモーターを実現
- イーサネット通信の実装
- 潜在的なコストとスペースを削減するために、IC レベルでの統合を改善するその他の方法：
 - ゲートドライバへのアクティブ放電機能の統合
 - ゲートドライバへの DC/DC コントローラ統合
 - バイアス電源へのトランス統合

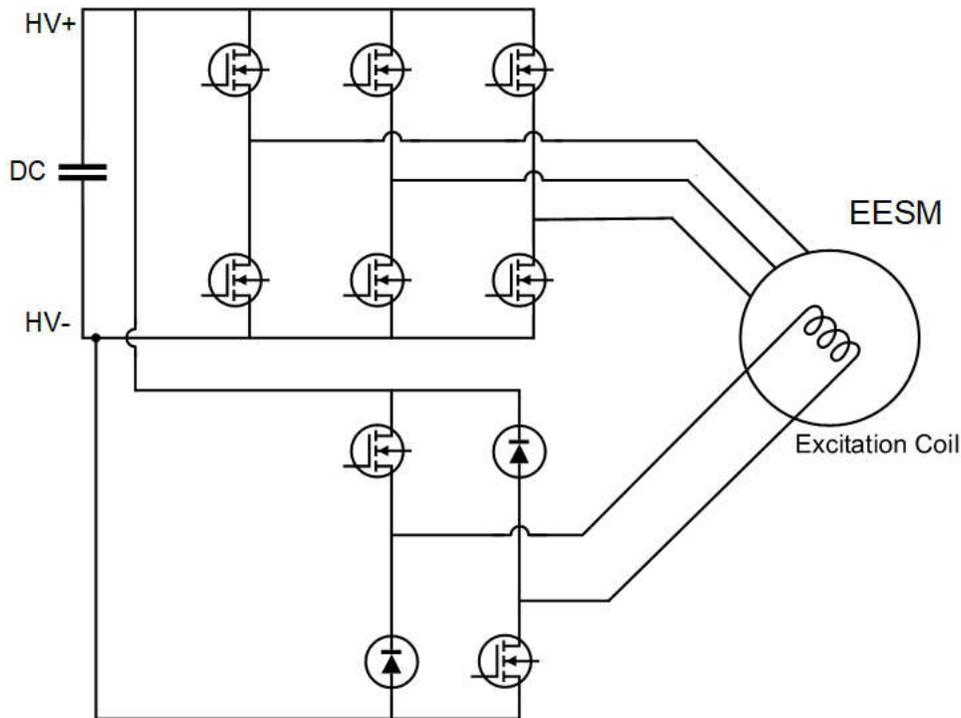


図 2-3. EESM トラクション インバータのシステム図

- 絶縁型ゲートドライバー – この IC は、LV 側のマイコンから PWM 信号入力を受け取り、HV 側にあるパワー モジュールのゲートを駆動します。絶縁型ゲートドライバーは、このデジタル信号を内部絶縁バリアを介して転送し、HV 側の信号を使用してパワー モジュールのゲートを駆動します。同時に、絶縁型ゲートドライバーは、危険な 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のを防止します。
- 絶縁型バイアス電源 – LV 側からのアナログ入力を受け取り、入力を HV 側に転送して、ゲートドライバーに 2 次側電源を供給する、ガルバニック絶縁された電源です。絶縁型ゲートドライバーは、アナログ電圧に PWM 信号を組み合わせ、電力段のゲートを駆動します。
- 絶縁型電圧 / 電流検出 – DC リンク電圧とモーター位相電流を検出し、モーターに適切なトルクが印加されていることを確認します。モーター制御ループにも使用されます。
- 位置検出 – 安全要件を満たす閉ループ制御に不可欠です。位置制御では、これらのセンサにより、既知の位置と動作中の位置を把握できます。
- アクティブ放電 – DC リンク 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。国連欧州経済委員会の国連規則第 94 号では、DC バス コンデンサの電圧を 5 秒以内に安全な電圧 (60V) まで低下させることが求められています。さらに、重要な機能に対してセルフテストを実行し、システム障害を防止する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、空間ベクトル 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。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、スイッチトリラクタンス モータなどがあります。

永久磁石で使用される、コストが高く、地政学的に不安定なレア アース材料を低減するため、外部励起同期モーター (EESM) は 2 次側の車軸だけでなく、1 次側にも使用されることが増えています。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™ 等があります。EESM では、永久磁石回転子の代わりに、個別の DC 励起電流によって駆動される電磁石が使用されます。例えば、従来のインバーター構造に追加された H ブリッジ設定などで使用されます。また、これにより回転子の磁束を動的に制御できます。これは一般的な磁石では実現できません。

4 マイコンとパワー マネージメント IC

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。TI は、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 ファミリーなど、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。マイコンとともに、電力と安全関連の通信ループを実現するには、高性能なパワー マネージメント IC (PMIC) を選択する必要があります。通常、マイコンと PMIC は連携ソケットと見なされますが、本質的な依存関係は存在しません。そのため、TI はマイコン ソケットとは独立して PMIC を評価できるようにし、システムのフレキシビリティと設計オプションを向上させています。

4.1 C2000™ ファミリー

TI 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。これらのマイコンは、フラッシュ メモリ、時間制約の厳しいアプリケーションでの並列測定に対応する A/D コンバータ (ADC) モジュール、高分解能パルス幅変調 (HRPWM)、デジタル信号プロセッサ (DSP) などを統合しています。C2000™ ファミリーの用途は、スタンドアロン インバータからフル パワートレイン統合まで広い範囲にわたっており、具体的にはトラクション 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、暖房、換気、空調 (HVAC) などに使用されています。

C2000™ マイコンは、リアルタイム処理向けの TI 独自の 64 ビット C29 CPU と、C2000™ 制御テクノロジーを備えています。この制御テクノロジーは、高度な制御に適した実績のあるフレキシブルなアーキテクチャです。C2000™ マイコンの実行時間の測定性能は、競合製品の中でも優れています (図 4-1 を参照)。特に、F29H85x デバイス ファミリーに搭載されている C2000™ マイコンは、次のような競争上の優位性を提供します。

- ASIL D までの機能安全に準拠
- 4MB のフラッシュ
- ハードウェア セキュリティ モジュール (HSM) と構成可能ロジック ブロック (CLB) を搭載し、以下をサポート。
 - AUTOSAR
 - MCAL

– サードパーティの基本ソフトウェア モジュール (BSW)

TI 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
- 本ファミリの 32 ビット浮動小数点演算または 64 ビット浮動小数点のサポート
- 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)。
- 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

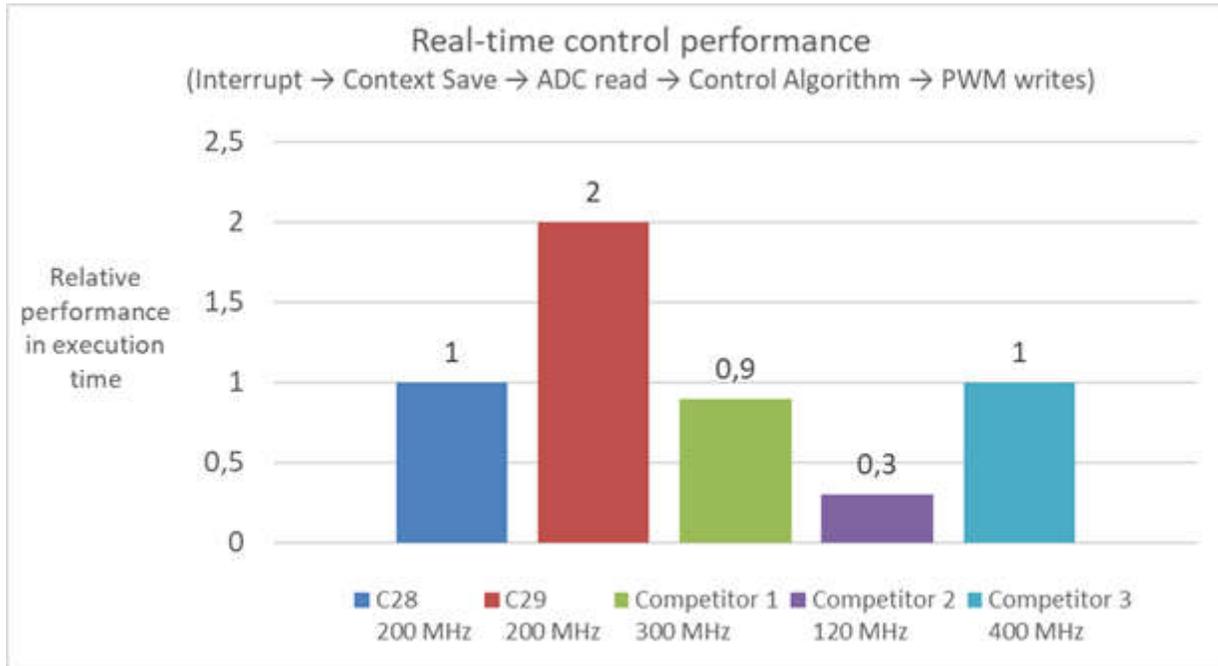


図 4-1. 競合製品と比較した TI の C29 マイコン ファミリのリアルタイム制御性能

4.2 パワー マネジメント IC

PMIC には、ウォッチドッグ (Q&A またはトリガ) タイマ、エラー信号監視、SPI、GPIO、I2C の各インターフェイスを使用した診断などのマイコン監視機能が内蔵されています。PMIC からマイコンへの通信は複雑であるため、トラクション インバータの設計者は多くの場合、両方のソケットを単一ベンダから選定しています。ただし、TI は、競合他社のマイコンをサポートするとともに、必要な機能安全のレベルを実現する幅広い安全 PMIC をセットアップしています。この追加サポートにより、柔軟な設計が可能です。

トラクション インバータの使用事例として、TI は以下の電力出力を持つ **TPS653860-Q1** および **TPS653861-Q1** PMIC デバイスを推奨しています。

- プリレギュレータ (昇降圧コンバータ): 6V、5V、または 4.3V の出力で 1.5A (バージョン 1) または 2.8A (バージョン 0)
- 保護付き LDO (PLDO) 1 および 2: VBAT および GND への短絡から保護し、1.xV、2.5V、3V、3.3V、5V で 最大 200mA
- バイパス モード対応 LDO 1 および 2: 1.0V ~ 1.8V、3.3V、5.0V で 600mA
- バイパス モード対応 LDO 3 および 4: 1.0V ~ 1.8V、3.3V、5.0V で 200mA、精度 1%

代表的なアプリケーション図については、[図 4-2](#) を参照してください。最大入力電圧が 36V の場合、48V バッテリーを搭載した車両にプリレギュレータ デバイスが必要です。このようなセットアップは、48V へのステップを扱う車両アーキテクチャ内の複数のアプリケーションで見られます。

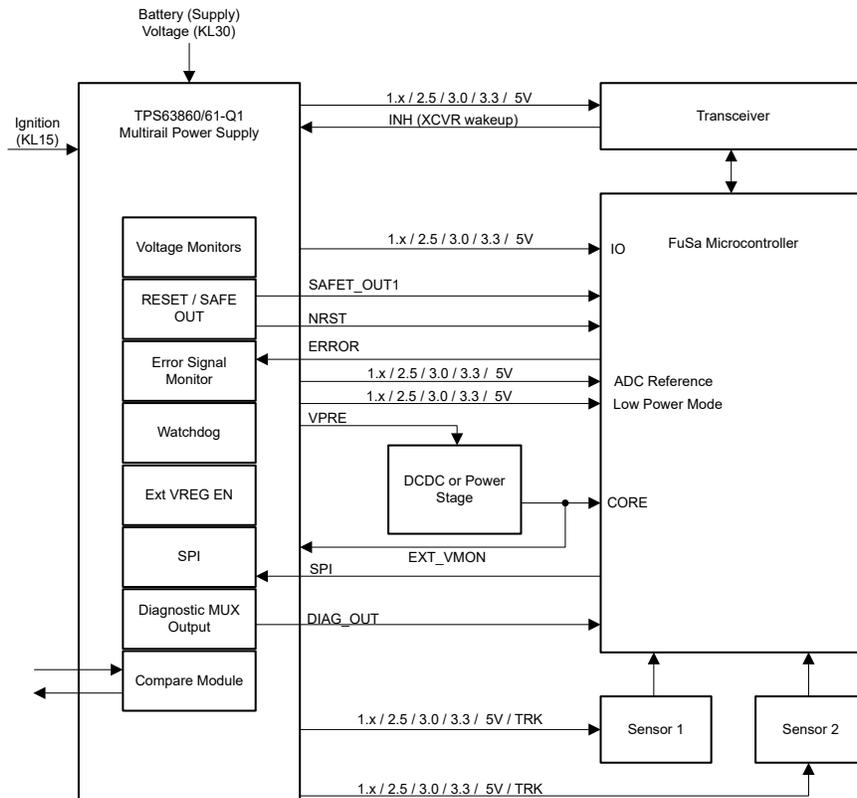


図 4-2. TPS65386x-Q1 PMIC の代表的なアプリケーション図

5 絶縁型ゲートドライバ

TI のゲートドライバ絶縁は最大 5.7kVRMS 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、主に以下の 2 つのファミリーがあります。

- 保護ゲートドライバ **UCC2182xx-Q1**
- プログラマブルゲートドライバ **UCC5881-Q1**

UCC2182xx-Q1 は、アクティブ保護機能と高度な安全機能を備えた絶縁型ゲートドライバです。強化絶縁を備えた複数の UVLO オプション (12V、15V、17V)、デサチュレーション (DESAT) 検出機能、過電流 (OC) 保護機能、過熱保護機能などを備えています。シンク/ソース電流は従来のデバイスから 15A に増加しています。一方、20-DFP パッケージによりフットプリントを 45% 削減できます。このデバイスは、ソフトシャットダウンピンによるシャットダウン電流の微調整、1 次側および 2 次側のアクティブ短絡 (ASC) 保護、起動時の内蔵セルフテストにより、診断機能のコンパレータをチェックできます。

プログラマブルゲートドライバ **UCC5881-Q1** は、プログラム可能なレジスタに由来して名前が付けられており、デバイスのデータシートに従い、UVLO や DESAT など、さまざまなパラメータを変更するように設定できます。これらのレジスタは、SPI を使用してアドレス指定できます。TI の最新世代のプログラマブルゲートドライバを使用すると、ゲートドライブの強度を変えることもできます。電力段のゲートを駆動するときは、強い駆動信号を使用すると、スイッチング損失が小さくなります。強い信号により、電圧降下でスイッチが電流の導通に費やす時間が短縮されるため、スイッチング損失が小さくなります。同時に、強い駆動信号によってオーバーシュートが大きくなり、ドレインソース間の電圧制限に近い値になる可能性があります。特にフル充電されたバッテリーパックでは、ヘッドルームが最小化されるため、スイッチが損傷する可能性があります。駆動信号が弱いと、オーバーシュートが小さくなり、動作が安全になりますが、スルーレートが低いとスイッチング損失が大きくなります。図 5-1 を参照してください。

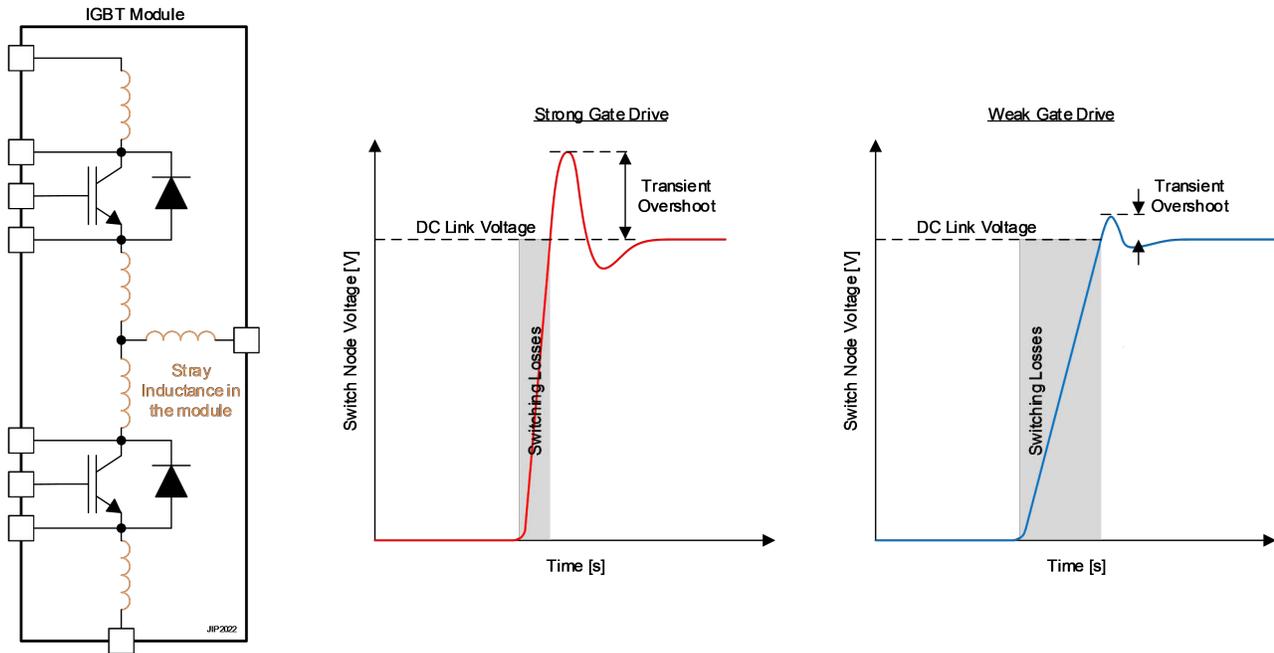


図 5-1. ゲートドライブの強弱の比較と、損失やオーバーシュートに及ぼす影響

UCC5881-Q1 などのプログラマブル ゲートドライバは、弱い駆動信号と強い駆動信号の両方を利用して、複合型の駆動を実現できます。駆動電流はスイッチ ノードの電圧立ち上がり時間に反比例するため、強い駆動電流によってスイッチ ノード電圧のスロープが増加します。電流が DC リンク (ターゲット) 電圧に達すると、スイッチ ノード電圧は短時間増加を続けた後、DC リンク (ターゲット) 電圧に戻ります。この追加の増加をオーバーシュートと呼びます。駆動電流が大きいほどスロープが高くなり、電圧レベルがドレインソース間の電圧制限に達しやすくなります。

プログラマブル ゲートドライブの強度 (SPI または GPIO を介して正確な動作モードを即座に設定可能) は、特定の出力電流まで強い駆動で動作し、その電流に達すると弱いゲートドライブ モードに切り替わります。この複合型駆動は、(強いゲートドライブのみと比較して) スイッチを損傷させるオーバーシュートのリスクを低減しながら、(弱いゲートドライブのみと比較して) 電力損失を大幅に節約できます (図 5-2 を参照)。

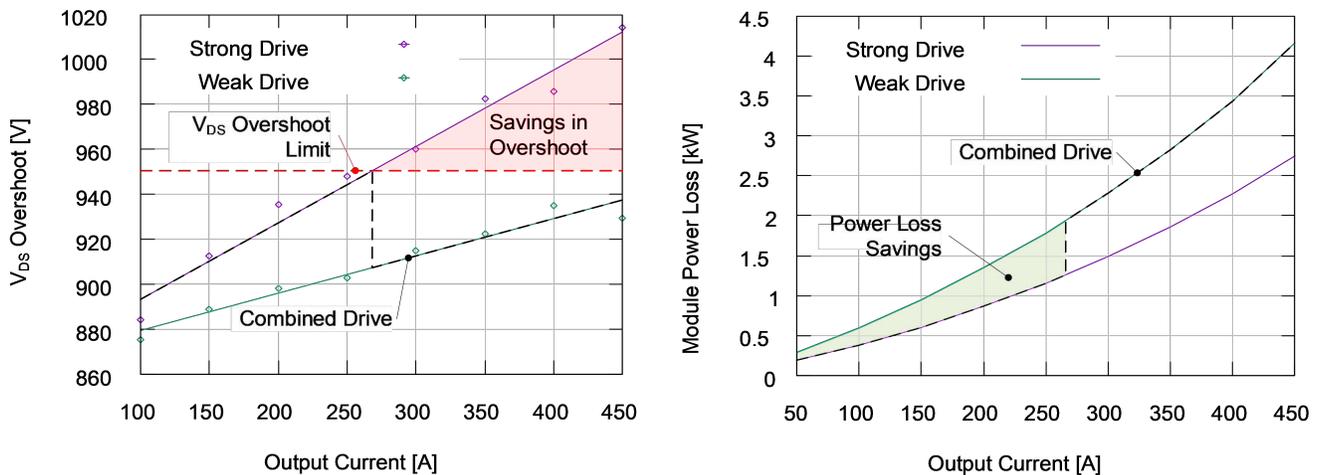


図 5-2. プログラマブル ゲートドライバの複合型駆動出力

CLTC ドライブ サイクルに基づき、可変駆動強度を使用した電力損失の節約は、次のような結果になります。

- インバータ効率が 2% 以上向上
- 140 ドル (米国通貨) のバッテリーコスト削減

- 15.5km の動作範囲拡大
- 9kg の重量削減
- 7.5L のバッテリー容量 (物理サイズ) 削減

図 5-3 に、実際のアプリケーションにおけるプログラマブル ゲートドライバの強度機能の実装を示します。強いゲートドライブ (20A) を使用した場合、ターンオフ過渡 (黄色の曲線) が $I_{LOAD} = 300A$ で VDS オーバーシュート制限値である 1080V に近づきます。このとき、GPIO ドライブの信号強度を変更すると (緑の曲線)、弱い駆動モード (5A) がオンになり、次のスイッチング サイクルで過渡電圧が 991V に低下します。

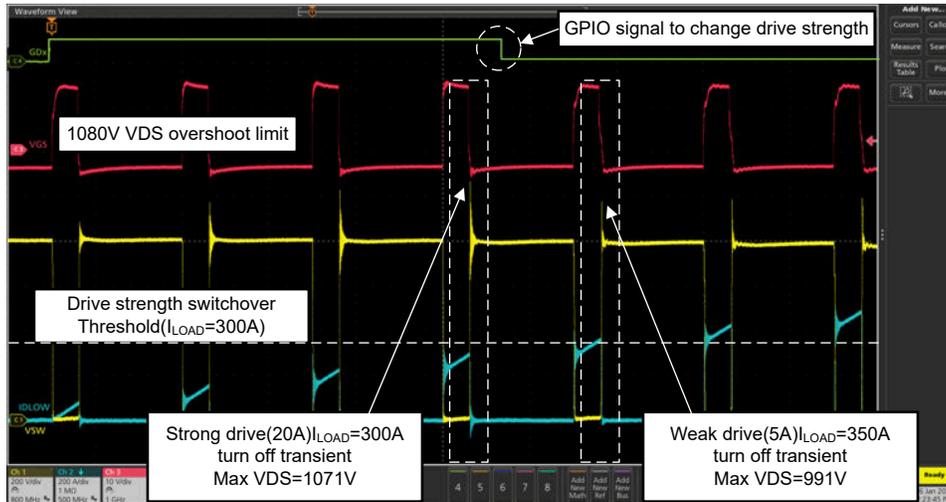


図 5-3. プログラム可能な駆動強度アプリケーションの例

UCC5881-Q1 ドライバファミリには、以下の追加機能が含まれています。

- 1 次側と 2 次側の ASC 保護機能により、システム設計のフレキシビリティを向上
- 調整可能なゲートドライブ ($\pm 15A$ および $\pm 5A$ の駆動電流) に対応したデュアル出力のスプリット出力ドライバ。4A アクティブ ミラー クランプを内蔵、または任意のミラー クランプ トランジスタの外部駆動にも対応
- インターロックおよび貫通電流保護と、プログラマブルな最小パルス除去
- 内部および外部電源の低電圧および過電圧保護
- ASIL D までの ISO26262 機能安全要件をサポートする総合診断機能。健全性監視 (システムの寿命全体にわたってスレッショルド電圧測定を実行)、故障予測 (故障を予測するためにパワー スイッチのデータをマイコンに提供) などを含む
- ショット抵抗をベースとする過電流保護
- 過熱 (PTC、NTC、ダイオード) および DESAT 検出
- 拡張温度範囲: $-40^{\circ}C \sim +125^{\circ}C$

UCC5880-Q1 インバータ評価基板 (EVM) は、基板に半田付けされた 100nF のコンデンサ負荷を使用してゲートドライバを単体でテストできるほか、Wolfspeed[®] XM3 SiC MOSFET をベースとするハーフブリッジ パワー モジュールを直接駆動して大電力のテストを行うこともできます。図 5-4 を参照してください。

絶縁型バイアス電源である UCC14241-Q1 を 2 個、基板に搭載しています。この評価基板 (EVM) は、一般的な SPI、デジチェーン接続、TI のアドレスをベースとする方式など、さまざまな SPI 通信方式に合わせてフレキシブルに構成することができます。この評価基板 (EVM) は、Sitara[™] や C2000[™] リアルタイム マイコン制御カードとのインターフェイスが可能で、最大 300kW の 3 相インバータ テストに使用可能です。

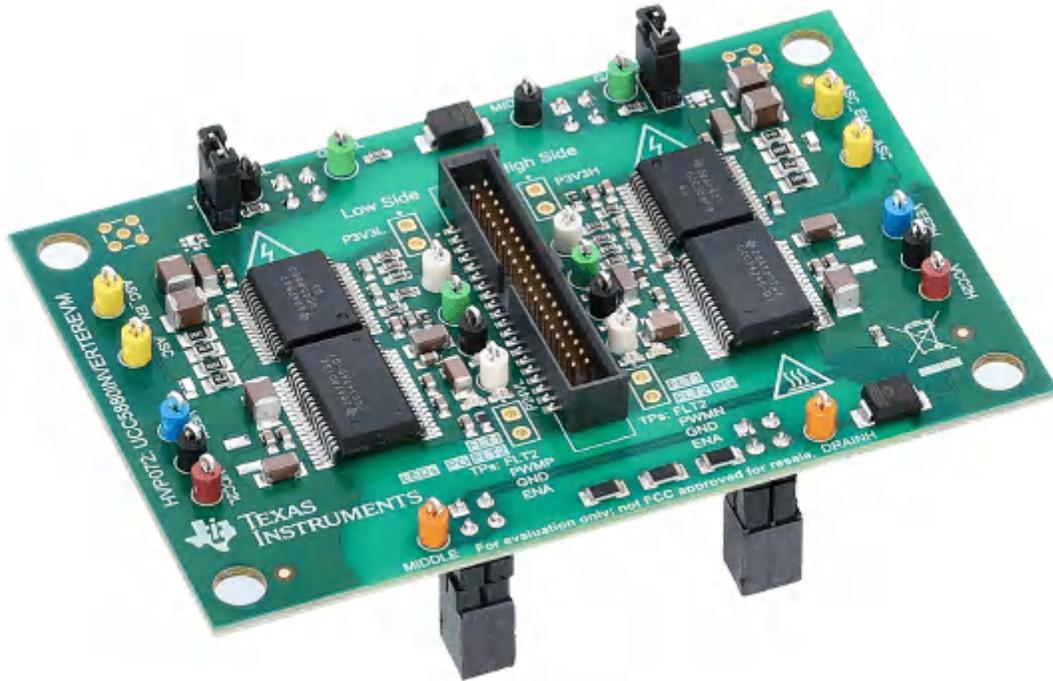


図 5-4. トラクション インバータにおける可変絶縁ゲートドライブ用 UCC5880-Q1 評価基板

6 低電圧絶縁型バイアス電源

トラクション インバータでは、低電圧絶縁型バイアス電源を 12V または 48V バッテリなどの低電圧源に接続して、ゲートドライバの 2 次側にバイアス電源を供給します。主に 3 つの低電圧絶縁型バイアス電源アーキテクチャがあります (図 6-1 を参照)。

- 完全分散型: 各ゲートドライバは、個別のバイアス電源に接続します。このシステムは PCB 配線が最も容易で、最も耐故障性がありますが、コストが高くなる可能性があります。
- 集中型: 複数出力を持つ単一のコンバータから、すべてのゲートドライバに電力を供給します。各ゲートドライバは、個別の絶縁型電源を受け取ることができます (1:6 トランスが必要です)。ただし、単一の 1:4 トランスを使用して、ハイサイドは個別に、ローサイドはまとめて供給する方法もあります。PWM ドライバ モジュールは、トランスを制御する電源の中央 IC として引き続き機能します。このシステムはコストを削減できる可能性があります。ただし、より大型のトランスが必要で、シングルポイント故障が発生した場合に機能安全分類の要件を満たすことが困難になります。
- 半分散型: これは、コストと故障冗長性のバランスを取った構成です。ローサイド ゲートドライバは 1:3 または 1:1 トランスからの単一バイアス電源を共有し、ハイサイド ゲートドライバにはそれぞれ個別のバイアス電源を供給します。

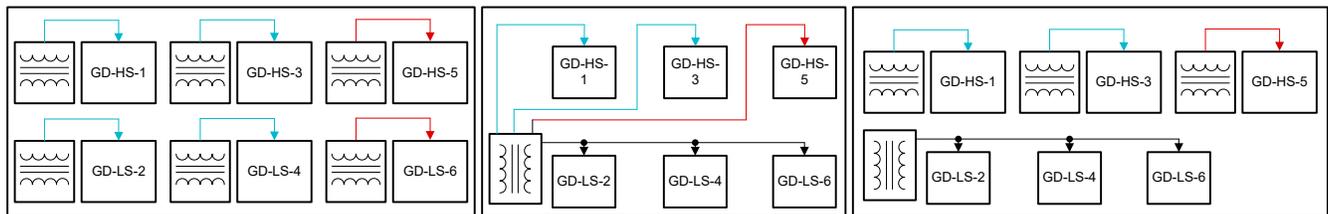


図 6-1. 低電圧バイアス電源アーキテクチャ

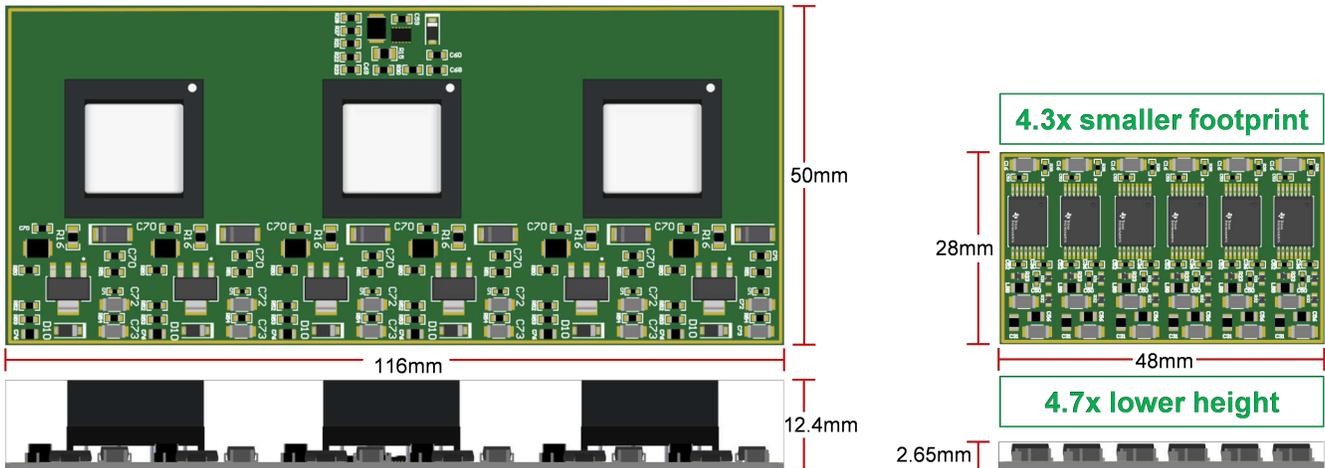
TI は、絶縁型バイアス電源の最も一般的な 4 つのトポロジを想定したさまざまな設計を提供しています。これには、1 次側レギュレーション対応フライバック コンバータ、開ループ プッシュプル コンバータ、開ループ インダクタ - インダクタ - コンデンサ (LLC) 共振コンバータ、完全統合型モジュールがあります。図 6-2 を参照してください。コンバータの代わりに、外部電界効果トランジスタ (FET) と外部磁気部品のみを使用するコントローラ オプションも利用できます。

	Primary side regulated flyback	Open-loop push-pull	Open-loop LLC	Fully integrated modules (full-bridge + transformer)
V_{IN} min / max	4.5 V / 65 V*	3 V / 36 V	9 V / 34 V	5.5 V / 20 V
Max POUT	Up to 15 W*	Up to 7.5 W	Up to 9 W	Up to 3 W*
V_{OUT} regulation	Regulated	Unregulated / V_{IN} controlled	Unregulated	Regulated
SW frequency	20-350 kHz	0.1 – 2 MHz	0.1 – 1.2 MHz	11 – 15 MHz
Isolation	Depends on transformer used			Up to 5 kV, basic/reinforced
Basic circuit				
Example devices	<u>LM(2)518x-Q1</u> , <u>LM515x-Q1</u>	<u>SN650x-Q1</u>	<u>UCC25800-Q1</u>	<u>UCC3414x-Q1</u> , <u>UCC3513x-Q1</u>

*depends on the variant

図 6-2. 絶縁型バイアス電源の一般的なトポロジ

UCC34xxx-Q1 および UCC35xxx-Q1 ファミリの絶縁型 DC/DC コンバータ モジュールは、広い入力電圧範囲 (5.5V ~ 28V) に対応しています。トランスが内蔵されているため、BOM フットプリントを縮小でき、他の設計よりコストを削減できる可能性があります。フル インバータ設計において、UCC34xxx-Q1 デバイスは、半分散型のフライバック設計に比べて、システムのフットプリントを 77%、部品数を 20% 削減します (図 6-3 を参照)。UCC34xxx-Q1 ファミリのデバイスは、出力電圧精度が 1.5% 以内で 1.5W の出力電力に達します。一方、新世代の UCC35xxx-Q1 ファミリのデバイスは、2W の電力を供給します。



Components reduction 113 → 90 Footprint shrink 5800 mm² → 1344mm²

図 6-3. コンバータ モジュール (完全分散型) とフライバック (半分散型) のシステム設計のサイズ比較

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 (LLC) 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 次側と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、ピン故障保護などの保護機能を利用した設計が可能です。

SN6507-Q1 デバイスは、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差がある 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処理、ピン構成可能なスルーレート制御機能も備えています。

LM2518x-Q1 ファミリのデバイスは、パワー スイッチを内蔵し、4.5V ~ 42V の幅広い入力電圧範囲で動作できる 1 次側レギュレーション対応 (PSR) フライバック コンバータです。1 次側フライバック電圧から絶縁型出力電圧をサンプリングし、フォトカプラ、電圧リファレンス、トランスの第 3 (補助) 巻線をいづれも必要とせずに出力電圧の安定化を実現します。境界導通モード (BCM) スwitchingにより、小型の磁気的設計と、±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。

7 高電圧絶縁型バイアス電源

システム レベルの安全性を向上させるために、トラクション インバータは多くの場合、高電圧絶縁型電源を必要とします。この電源は高電圧 (HV) バッテリからの電力を変換し、低電圧側に接続することで、冗長なパワー パスを作成します。したがって、低電圧電源パスでデバイスの障害が発生した場合、HV バッテリからシステムへ電力を供給できます。この電源は ASC に必要です。ASC では、HS または LS 電力段に電力を供給してシステムを安全な状態にする必要があります。

この高電圧絶縁型電源は、入力電圧が 30V まで低下したときに起動できる必要があります。また、800V バッテリの場合、ロードダンプのシナリオを含め、充電状態 (SOC) を考慮して、最大 1kV で動作できることも必要です。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。モーターは回転を開始し、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、モーターをアクティブに短絡させることができます。低電圧絶縁型バイアス電源と同様に、デバイスには DC/DC コントローラ、コンバータ、統合型モジュールを使用することができます。

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。

- **UCC28C56EVM-066** – 1 次側制御フライバックレギュレータ用評価基板、40V ~ 1kV 入力、15V_{out}、40W PSR フライバック
- **TIDA-01505** – 回生ブレーキの安全性テストをサポートする車載、40V ~ 1kV 入力フライバックのリファレンス デザイン
- **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
- **PMP10200** – 超広い入力電圧範囲 PSR フライバックコンバータのリファレンス デザイン

テキサス インスツルメンツは、デバイスレベルで高電圧絶縁型バイアス電源のための複数のトポロジをサポートしています。表 7-1 を参照してください。

表 7-1. 高電圧絶縁型バイアス電源のトポロジをサポートする TI の各種デバイス

デバイス	UCC28C5x-Q1	UCC28700-Q1	UCC28730-Q1	UCC28740-Q1	UCC28781-Q1
スイッチングタイプ	ハードスイッチング	バレー スwitching	バレー スwitching	バレー スwitching	ゼロ電圧スイッチング (ZVS)
フィードバックレギュレーション	1 次側、2 次側 (フォトカプラ)	プライマリ	プライマリ	2 次側 (フォトカプラ)	2 次側 (フォトカプラ)
代表的な電力レベル	20W – 100W	2W – 50W	2W – 50W	2W – 50W	50W – 150W

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 ~ 5 秒未満で安全に接触できるようにする必要があります緊急事態時の対応は、マイコンを使用せず、ローカルで (例えばトラクション インバータ内部で) 動作させる必要があります。
- 車両のキーオフ時は、すべてのシステムが動作可能な状態にあるため、放電は数分以内に実行されます。
- ASIL D のシステムレベル安全性要件

TI 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。一般に、アクティブ放電消費方法は、抵抗性放電、電力段を経由する放電、モーター巻線を介した放電の 3 つのカテゴリに分類できます。

抵抗性放電では、ブリーダ抵抗を使用することも可能ですが、常に電流を引き込むため、放電速度が遅すぎる可能性があります。したがって、スイッチ抵抗を使用できます。スイッチ抵抗を使用すると、以下のように、オン/オフ制御と PWM スイッチング制御の両方を実現できます。

- **TPSI3100-Q1** デバイスを使用したパワー トランジスタのオン/オフ制御。TPSI3100-Q1 強化絶縁型スイッチ ドライバには 17V のゲート電源が内蔵されており、1 次側バイアス電源から供給される電力から 2 次側バイアス電源を統合しているため、2 次側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。外部パワー スイッチと組み合わせることで、包括的な絶縁型ソリッド ステートリレー構成を形成します。内蔵デュアル高速コンパレータにより、複数の診断機能を備えた通信バックチャンネルが可能になります。
- **AFE539F1-Q1** デバイスを使用した PWM 制御。AFE539F1-Q1 スマート AFE デバイスには、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。このデバイスはプログラミング機能とロジックも追加されており、マイコンがなくても動作できます。図 8-1 に、AFE539F1-Q1 デバイスを使用した DC リンク放電のオシロスコープ画像を示します。チャンネル 1 (黄色) は AFE539F1-Q1 出力、チャンネル 2 (ピンク) は 950V から 0V への電圧降下を示しています。チャンネル 3 (青) はゲートドライバへの EN 信号入力であり、アクティブ放電を開始します。チャンネル 4 (緑) は SiC FET のドレインソース間電流です。

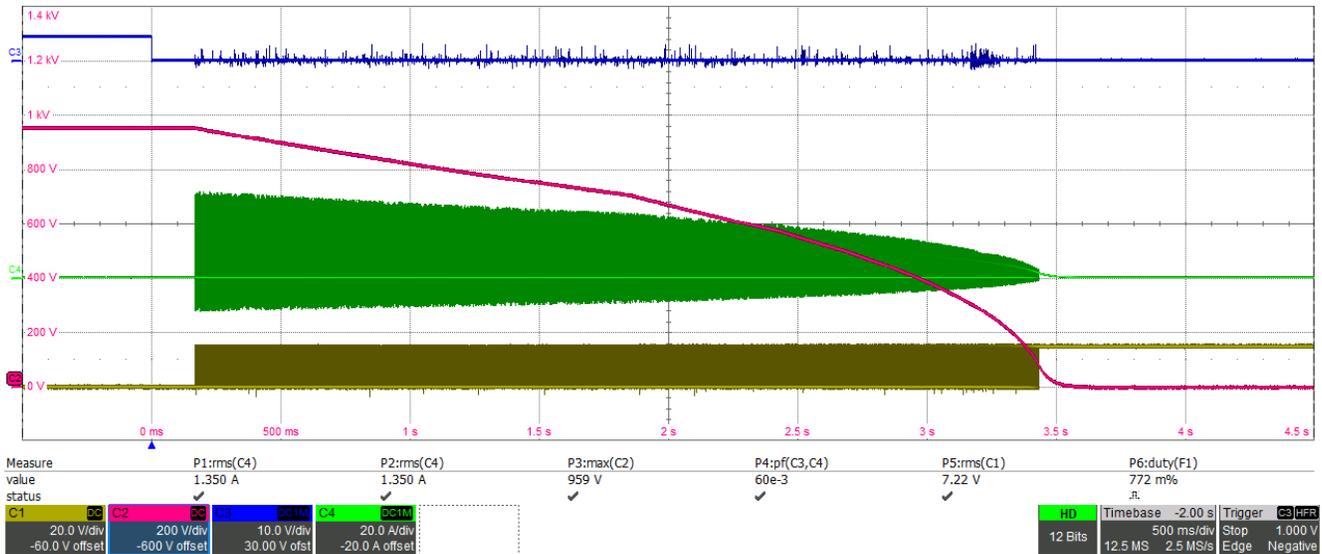


図 8-1. スマート AFE に基づく DC リンクアクティブ放電 (左) とテスト波形 (右)

モーター巻線を介してエネルギーを放電できます。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。大きな負の 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。TI の SitarTM または C2000TM マイコンによる高速ループ制御と安全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) のプログラミング機能が備わっており、6 つの ADC チャンネルが、信頼性の高いスムーズな放電制御を実現します。この設計はコスト効率が高くなる可能性があります。マイコンからバイアス電源やゲートドライバまで、フル機能のシステムが必要です。

トラクション インバータ設計における今後のトレンドとして、電力段を介した放電があります。この方法では、電力段のパス動作モードにより、MOSFET のリニア領域を通過して放電が可能になります。このとき、MOSFET は抵抗として振る舞います。これを実現するには、MOSFET に過剰な負荷を与えないよう、ゲートドライバは非常に高精度のゲート制御と高周波のパルス動作が必要です。代替手段として、ゲートドライバによりパルス短絡動作モードを駆動し、DC リンク電圧を放電することもできます。

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、安全要件を満たす閉ループ制御に不可欠です。位置制御では、これらのセンサにより、既知の位置と動作中の位置を把握できます。一般に、レゾルバ構造と誘導性検出の2つの方法を検討でき、誘導性検出ではシステム設計を簡素化できます。

レゾルバの方式は、回転トランスの原理を採用しています(図 9-1 を参照)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次巻線を備えています。TIのALM2403-Q1 デバイスなどの励起アンプを用いて、マイコンからのPWM信号により1次巻線に励起電圧(V_{EXC})を印加すると、電流が流れて磁束が発生します。この磁束は、回転子の回転角度に応じて2次巻線の中を通過して分布し、 V_{SIN} と V_{COS} を誘導します。フィードバック信号は、大半がシングルエンドですが、差動信号からシングルエンド出力に変換することもできます。セーフティマイコンは、レゾルバの2次巻線の電圧比から回転子の角度を再取得します。

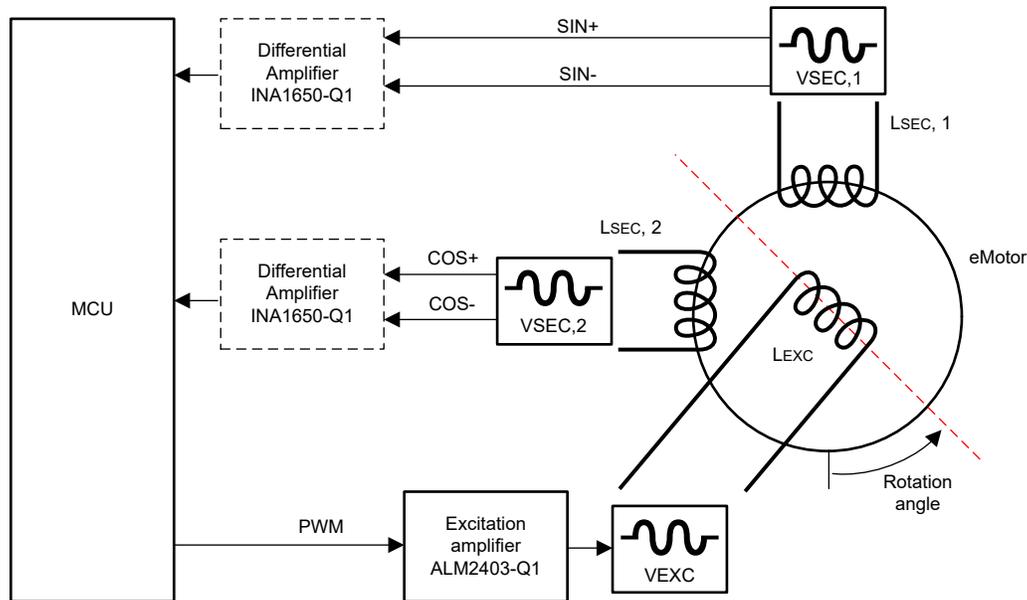


図 9-1. モーター回転角度を取得するための励起コイル L_{EXC} および 2 次コイル $L_{SEC1/2}$ を備えたレゾルバ構造

誘導性位置検出用に、TIのLCD5072-Q1 誘導性位置センサフロントエンド(図 9-2 を参照)を励起コイル(黒)および検出コイル(色付き)と組み合わせて、回転子に固定された導電性ターゲットをカバーします。LCD5072-Q1 デバイスにはLC発振器が内蔵されており、励起コイルに対して2.4MHz ~ 5MHzの励起電流を生成できます。これにより、外部励起構造が不要になり、システムのシンプルさが向上します。ターゲット(アルミニウムまたは銅製)とPCBコイルは互いに平行に配置されており、励起電流によってターゲット内に渦電流が発生します。これにより、誘導された正弦および余弦エンベロップ電圧も検出コイルに生成されます。誘導電圧の振幅は、モーターの角度位置によって決定されます。次に、LCD5072-Q1 デバイスによって検出信号が復調され、正弦信号と余弦信号の出力がマイコンに送信されて、角度計算が行われます。

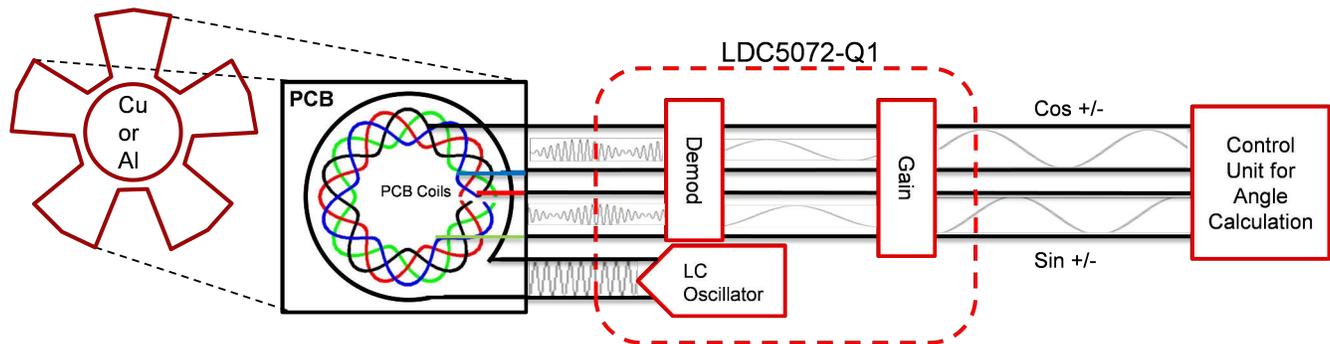


図 9-2. LCD5072-Q1 を使用した誘導性検出の図

LCD5072-Q1 デバイスは、最大 480,000rpm のターゲット速度において、角度精度 1° 以内で非常に高い回転速度をサポートしています。このデバイスは、機能安全の要件に関する ISO26262 に準拠して設計されています。

TLC5072Q1EVM 評価基板を使用すると、センサ フロント エンドの動作と性能を迅速かつ簡単なセットアップで評価できます。

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ー位相電流などの電圧と電流を測定します。TI は、絶縁型電圧と絶縁型電流の両方の測定機能を実現し、トラクション インバータの設計で機能安全要件レベルを達成するのに役立つ各種デザインを提供しています。このデザインには、デジタル変調器 (デジタル出力) とデジタル アンプ (アナログ出力) の両方に加え、ホール エフェクト検出が搭載されています。デジタル出力アイソレータは信号忠実度の向上を実現するのに対し、アナログ出力アイソレータを採用すると、ハードウェア設計者の観点でシステム設計を容易にすることができます。

10.1 絶縁型電流検出

ホール エフェクト電流検出は、ワイヤまたはバスバーを流れる電流から放射される磁界を検出することで動作します。この磁界によりセンサにホール電圧が誘導され、これを使用してワイヤを流れる初期電流を計算できます。この方法は個々のワイヤに接触せず、大電流がセンサに流れませんが、浮遊磁界の影響が生じやすくなります。

測定を改善するため、ほとんどのホール エフェクト センサでは、いわゆる C コア構造を利用しています。これらの構造は、センサ上の磁界を導くリング状の強磁性体です。この方法は信頼性が高く、変位誤差の影響を受けにくいですが、C コア用に必要なスペースが必要となり、システム全体の BOM コストと重量が増加する可能性があります。そのため、設計者は他の電流センサ方法も評価してきましたが、これらの方法はいずれも、システムにシールドまたはバスバーの変更が必要になります。

TI の **TMCS2100-Q1** ホール エフェクト センサは、C コアやその他の主要な変更を完全に回避するため、マルチセンサ コアレス設計となります。**TMCS2100-Q1** デバイスは、構成可能な過電流検出機能を備え、1A から 1kA ピーク以上の超大電流に対応する高精度のプログラマブルなコアレス ホール エフェクト電流センサです。このデバイスは、バスバーの機械的構成をサポートしており、ノッチやシールドなどのカスタム バスバー設計は完全に不要です。図 10-1 を参照してください。

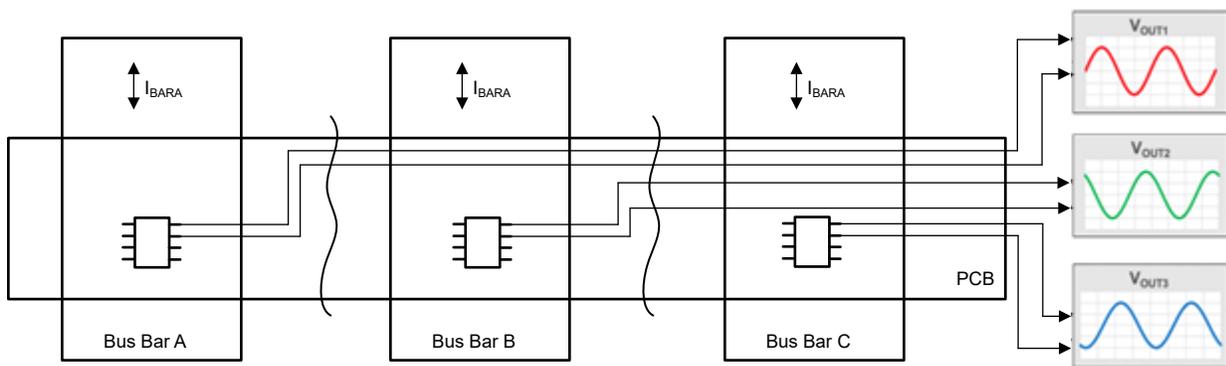


図 10-1. TMCS2100-Q1 の物理セットアップ

バスバーの間隔を最小 5mm まで縮小しても、クロストークの影響は緩和されます。1mm での変位誤差は 3.7% に抑えられ、さまざまな寿命パラメータで優れた精度を実現します。トラクション インバータにおける主要なホール エフェクト ベースの電流センサ設計と比較すると、マルチセンサ コアレス設計の強みが明確になります。

表 10-1. トラクション インバータにおける電流検出のさまざまな方法

主要なシステム要件	C コア	U-Shield	差動コアレス	TMCS2100-Q1 マルチセンサ コアレス
製造しやすさ	購入または自社構築	サイズまたはバスバーの変更が必要	バスバーの変更が必要	IC のみ
位相クロストーク除去	コア設計により 1% 未満	シールドにより 1% 未満	センサ間隔 2.6mm の場合、1.8% 超	顧客キャリブレーションにより 1% 未満

表 10-1. トラクション インバータにおける電流検出のさまざまな方法 (続き)

主要なシステム要件	C コア	U-Shield	差動コアレス	TMCS2100-Q1 マルチセンサ コアレス	
浮遊磁界除去	コア設計	シールド	差動	差動	
変位誤差	該当なし	1mm → 約 3.5%	1mm → 42%	1mm → 3.7%	
位相遅延 (1kHz 時)	< 4°	< 3°	> 4°	< 2°	
相あたりの IC 電力	25mA 以上	10mA ~ 15mA	16-25mA	50mA	
精度	過熱	3% + コア	2%	4%	1%
	直線性	3%	1%	1%	0.1%
	全周波数帯域	3% + コア	5% 未満	>5%	1%
	寿命期間全体	>5%	>7.5%	>3%	1%
高さ (バスバーの上)	15mm	14mm 超	2mm 未満	3mm 超	
システムの複雑さ	IC + コア +ハウジング + 治具	IC + シールド + バスバー変更 + 治具	IC + バスバー変更 + 治具	IC + 治具	

TI は **TMCS1123-Q1** や **TMCS1126-Q1** デバイスなどの一般的なホール エフェクト電流センサも提供しています。これらの製品は、周囲磁界除去機能と設定可能な過電流保護を備え、**5kV** の強化絶縁および **1100V** の強化動作電圧を実現しています。電流定格の制限により、**EESM** モーター システムの励起回路に **TMCS1123-Q1** および **TMCS1126-Q1** デバイスを使用することを推奨します。

3 つの出力相すべてにおける電流検出が一般的ですが、別の選択肢は、3 相のうち 2 相のみを検出し、3 番目の値を再計算することです。これは、3 つの電流が合計でゼロになるように設計されているためです。ただし、トラクション インバータは EV パワートレインの一部であり、安全性が非常に重要です。したがって、この選択肢には設計上のリスクが伴います。

10.2 絶縁電圧検出

絶縁型ゲートドライバと同様に、絶縁型電圧センサも DC リンク (HV 側) から絶縁バリアを越えてマイコン (LV 側) に信号を転送するために、HV 側と LV 側の両方に電源が必要です。これは **UCC28700-Q1** デバイスなど、トランスとドライバを組み合わせることで両側に電源電圧を供給することで実現できます。また、TI は電源内蔵の絶縁型電圧センサも提供しています。

ここで、**AMC33xx-Q1** デバイス ファミリ (**AMC3330-Q1** デバイスなど) は、内部の絶縁型 DC/DC コンバータを使用し、デバイスのローサイドから単一電源で絶縁できるため、システムの複雑さを大幅に低減しています。入力では、高電圧信号を検出するための抵抗デバイダ回路など、高入力インピーダンスの電圧測定に $\pm 1V$ を印加することができます。このデバイスはアナログ出力を備えています。

HV システムで電圧を検出するには、電圧センス デバイスの入力に抵抗ラダーを配置し、電圧センス IC として許容可能なスケールまで入力の電圧を低減する必要があります。この抵抗デバイダ回路により、システムに追加のスペースが必要となり、コストが増える可能性があります。また、必要な出力電圧を得るには微調整する必要があります。TI は、**12.5M Ω** の固定入力抵抗と最大 **1400VDC** の入力電圧を持つマッチング抵抗デバイダを提供しています。**RES60A-Q1** デバイスは、公称値の $\pm 0.1\%$ 以内の高い分圧比マッチング精度を特長としています。

AMC038x-Q1 デバイス ファミリ (**AMC038D-Q1** デバイスなど) は、内蔵の抵抗デバイダを提供することで、この問題を解決します (図 10-2 を参照)。入力側の抵抗デバイダは、HVIN ピンに印加される電圧を $\pm 1V$ 線形フルスケール レベルに分圧します。この信号は SNSP ピンでも利用できます。本デバイスの出力は、入力信号に比例する差動信号です。

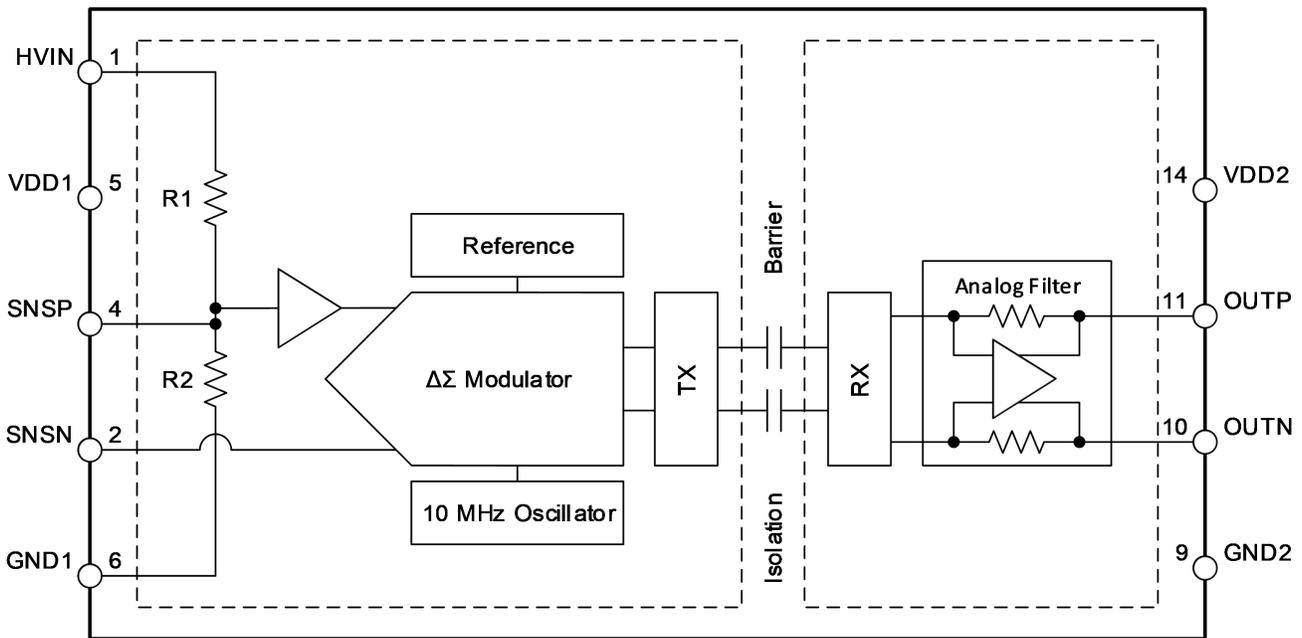


図 10-2. AMC0380D-Q1 のブロック図

内蔵の抵抗デバイダにより、基板面積を大幅に削減できます (図 10-3 を参照)。同時に、ゲイン誤差が出荷時にキャリブレーションされていることと、内部抵抗デバイダの温度ドリフトが非常に小さいことにより、精度が向上します。通常、キャリブレーションなしでも 1% 未満の測定精度を実現できます。内蔵の抵抗デバイダは寿命全体でのドリフトが非常に小さく、さらに、デルタシグマ変調器、シングルエンド出力、差動出力モードの 3 種類の出力オプションがあります。

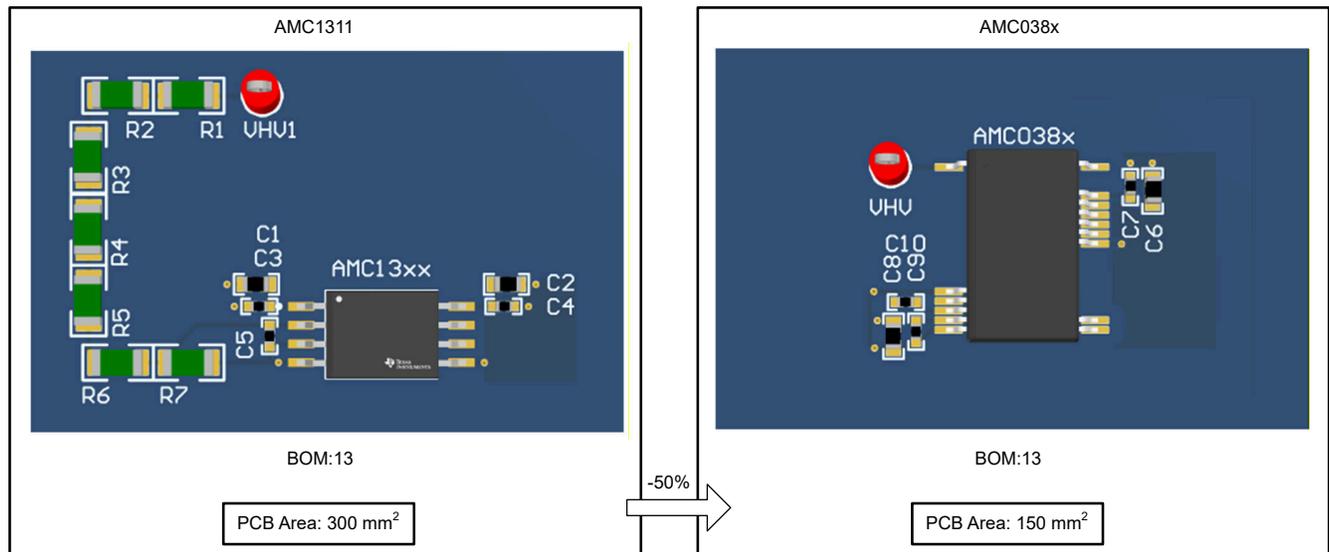


図 10-3. 抵抗デバイダを TI の AMC038x-Q1 ファミリーに内蔵することでシステム面積を削減

11 システム エンジニアリングとリファレンス デザイン

TI のシステム エンジニアリング チームは、TI の幅広い製品ラインアップを活用して最適化されたシステム設計の開発に注力しています。これにより、お客様のシステム設計サイクルの短縮を支援します。以前に開発されたリファレンス デザインを以下に示します。

- [TIDM-02014](#) SiC トラクション インバータのリファレンス デザイン (図 11-1 を参照)。

TIDM-02014 は、テキサス インストルメンツと Wolfspeed®が開発した、800V、300kW、SiC ベースのトラクション インバータ システムのリファレンス デザインです。このデザインは、OEM や設計エンジニアが高性能かつ高効率のトラクション インバータ システムを開発し、市場投入を迅速化するための基盤を提供します。このデザインは、TI と Wolfspeed®が開発したトラクション インバータ システムの技術を使用してシステムの効率を向上させる方法を提示します。そのために、高性能の絶縁型ゲートドライバと、パワー モジュールを駆動するリアルタイムの可変ゲートドライブ機能を活用してオーバーシュートを低減し、許容可能な電圧範囲内にとどめます。絶縁型ゲートドライバと TI の絶縁型バイアス電源設計を組み合わせると、PCB サイズを大幅に縮小し(高さ 4mm 未満、PCB 面積を 1/2 以上縮小)、30 個以上のディスクリート部品を排除して、システムの電力密度を向上できます。さらに、制御性能の優れた TI のマイコンは、高度に統合されたリアルタイム パリフェラルを複数搭載しており、20,000rpm を上回る速度のトラクション モーターを効果的に制御できます。本デザインの高速電流ループの実装は、モーターのトルクリップルを最小限に抑え、滑らかな速度トルク プロファイルを実現するのに役立ちます。システムの機械的および熱的設計は、Wolfspeed®によって実現されます。

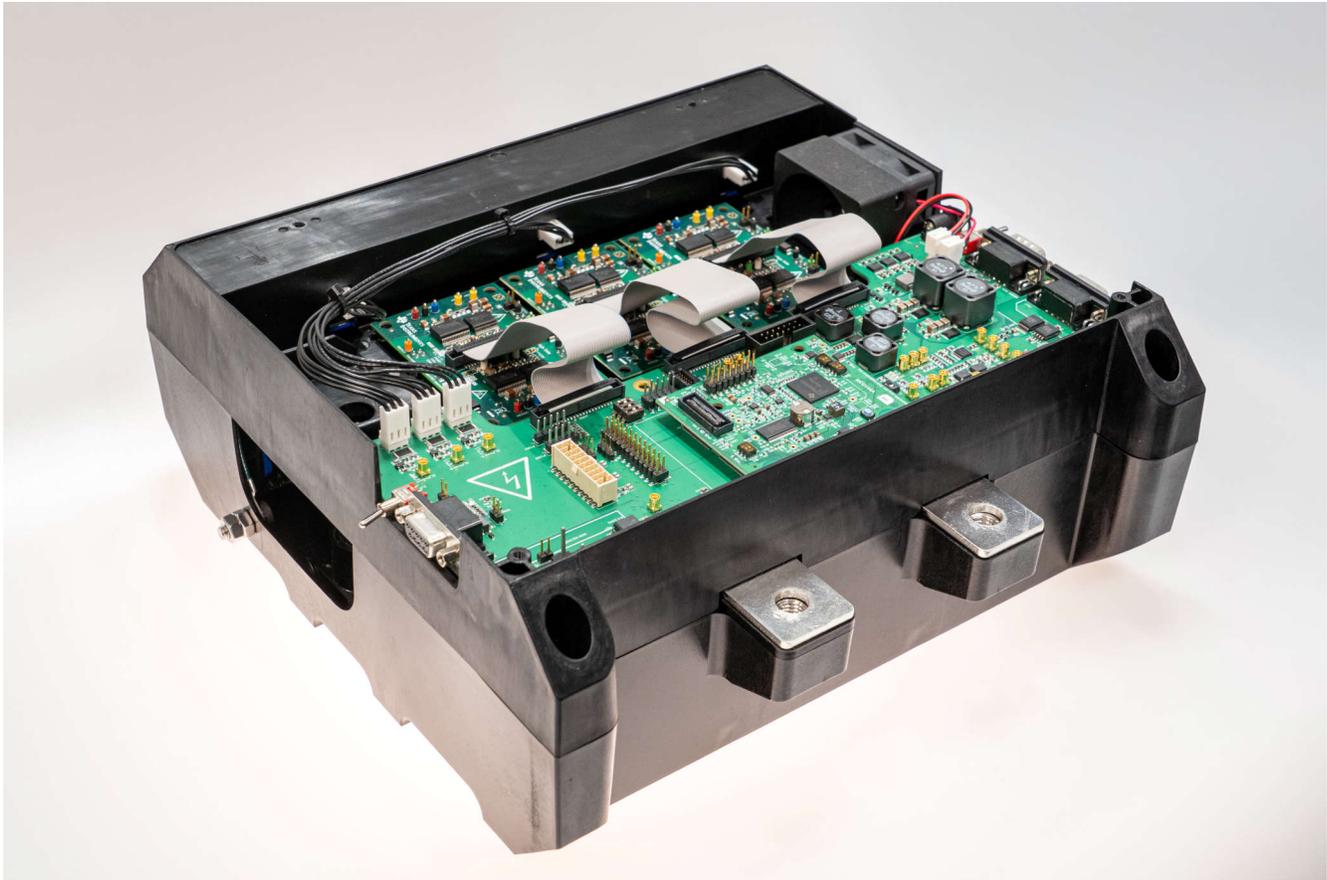


図 11-1. TIDM-02014 トラクション インバータのリファレンス デザイン

- [UCC5880INVERTEREVM](#) ゲートドライバの評価基板:

[UCC5880INVERTEREVM](#) 基板は、基板に半田付けされた 100nF のコンデンサ負荷を使用して [UCC5880-Q1](#) ドライバを単体でテストできるほか、[Wolfspeed® XM3 SiC MOSFET](#) をベースとするハーフブリッジ パワー モジュールを直接駆動して大電力のテストを行うこともできます。2 個の [UCC14240-Q1](#) 絶縁型バイアス電源をボードに搭載しています。この評価基板 (EVM) は、一般的な SPI、デイジーチェーン接続、TI のアドレスをベースとする方式など、さまざまな SPI 通信方式に合わせてフレキシブルに構成することができます。この評価基板は、[Sitara™](#) や [C2000™](#) リアルタイム マイコン制御カードとのインターフェイスが可能で、最大 300kW の 3 相インバータ テストに使用可能です。

- [TIDA-01527](#) 用ディスクリートリゾルバのリファレンス デザイン:

[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ートリゾルバ 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、ディスクリー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% 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ることも期待できます。

12 まとめ

車載用トラクション インバータのテクノロジーは、800V、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。すべての関連分野で、TI のテクノロジーは、新しいデバイスの採用と大幅な改善によって技術の最先端を実現しています。

C2000™ マイコン ファミリーで、TI の新世代の C29 コアを採用すると、競合製品と比較して超高速の相対性能を実現できます (特に F29H58x デバイス ファミリーで顕著です)。新世代の TPS653860-Q1 および TPS653861-Q1 PMIC を採用すると、必要なすべての制御メカニズムを備えているため、システムの安全性要件にすべて準拠できます。同時に、競合他社のマイコンとも連携して動作できるため、設計作業を簡素化できます。

新世代の UCC5881-Q1 ゲートドライバを使用すると、調整可能なゲートドライブ強度によりモーター制御効率が向上し、システム効率が 2% 以上改善します。さらに、スペースの節減と潜在的なコストの削減も可能になります。新製品である UCC34141-Q1 LV 絶縁型バイアス モジュールは、内蔵トランスによりシステム サイズを大幅に (最大 77%) 削減できます。

TMCS2100-Q1 デバイスには完全に新しい電流検出方法が採用されているため、重くて高価な C コア構造が不要になり、トラクション インバータの設計が向上します。このデバイスには抵抗デバイスまたは DC/DC 電源が絶縁型電圧検出回路に統合されており、BOM のサイズを大幅に縮小しています。TI は、LDC5072-Q1 AFE デバイスを使用した誘導性モーター位置検出も実現し、励起器なしでレゾルバの代替設定ができます。これにより、設計者の観点から検出設定を簡素化できます。

13 参考資料

所有者	リファレンス	ドキュメントタイプ	情報の概要
テキサス・インスツルメンツ	『C2000™ 制御マイコンの最適化されたシグナルチェーンを紹介するリアルタイム ベンチマーク』	アプリケーション ノート	C2000™ がリアルタイム シグナル チェーンにもたらす利点に関する情報 (ソフトウェア ベンチマークを含む)。
テキサス・インスツルメンツ	『HEV および EV トラクション インバータ向けの絶縁型バイアス電源アーキテクチャ』	テクニカル ホワイトペーパー	トラクション インバータの絶縁型バイアス電源に関する情報。
テキサス・インスツルメンツ	「スマート DAC とは」	技術記事	スマート AFE デバイスに関する情報。
テキサス・インスツルメンツ	『高信頼性と低コストを両立させる絶縁技術により高電圧設計の様々な課題を解決』	ホワイト ペーパー	ガルバニック絶縁の概要、高電圧システムにおける一般的な絶縁方法、および絶縁 IC が設計者にどのように役立つかについて。

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](#)、[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 © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日 : 2025 年 10 月