

## Design Guide:

# 車載用、大電力、高性能 SiC トラクション・インバータのリファレンス・デザイン



## 概要

TIDM-2014 は、テキサス・インスツルメンツと Wolfspeed が開発した 800V、300kW の 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、設計エンジニアが高性能で高効率のトラクション・インバータ・システムを作成して市場に投入するまでの期間を短縮するための基盤として使用できます。この設計は、リアルタイムの可変ゲート駆動強度を持つ高性能絶縁型ゲート・ドライバ、トランス内蔵の絶縁型バイアス電源、機能安全要件をサポートしながら 20,000RPM を上回る速度のトラクション・モーターを制御できるテキサス・インスツルメンツの高リアルタイム性能 MCU を採用しています。

## リソース

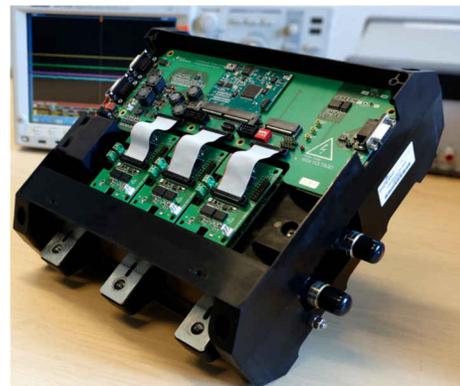
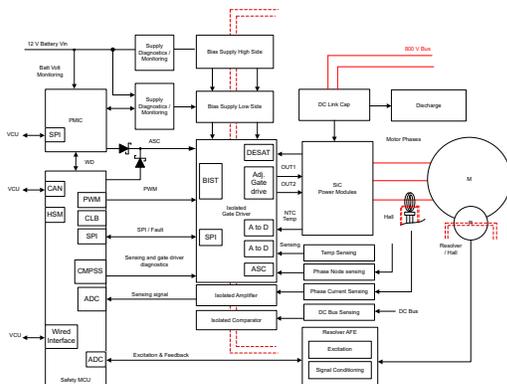
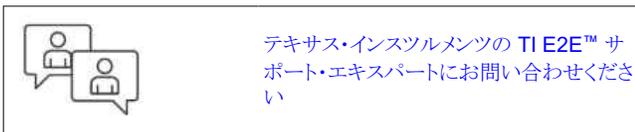
<a href="#">TIDM-02014</a>	デザイン・フォルダ
<a href="#">UCC5880-Q1, AM2634-Q1</a>	プロダクト・フォルダ
<a href="#">TMS320F280039C-Q1, UCC14240-Q1</a>	プロダクト・フォルダ
<a href="#">UCC12051-Q1, AMC3330-Q1</a>	プロダクト・フォルダ
<a href="#">TCAN1462-Q1, ISO1042-Q1, ALM2403-Q1</a>	プロダクト・フォルダ

## 特長

- リアルタイムの可変ゲート駆動強度機能により、SiC スイッチングの電力損失を最小限に抑えてシステムの効率を向上でき、正確なバイアス電源により導電損失を最小限に抑える。
- 絶縁型ゲート・ドライバとバイアス電源モジュールにより、PCB 面積を 30% 削減。
- 高性能 MCU により、業界最速のモーター制御ループ (2μs 未満) を達成し、トルク・リップルを最小限に抑え、トラクション・モーターで滑らかな速度とトルク電流プロファイルを実現。
- UCC5880-Q1 および AM2634-Q1 は、機能安全準拠デバイス。
- 強化された定格静電容量性絶縁技術と早期障害検出により、システムの信頼性を向上。

## アプリケーション

- HEV/EV のトラクション・インバータ



## 1 システムの説明

トラクション・インバータ・システムは、電気自動車のコア・サブシステムです。このシステムは、加速と速度の点でドライバーの運転体験に直接貢献するだけでなく、電気自動車の有効走行距離にも影響を及ぼします。TIDM-02014 リファレンス・デザインは、テキサス・インスツルメンツと **Wolfspeed** が提供する 800V、300kW の SiC ベース・インバータのリファレンス・デザインであり、設計者とエンジニアが高性能で高効率のトラクション・インバータ・システムを実現するための出発点となります。

このデザインでは、高性能絶縁型ゲート・ドライバを使用して利用可能な電圧のオーバーシュートを低減することにより、システムの効率を向上させるトラクション・インバータ・システム・テクノロジーを紹介します。ゲート・ドライバのリアルタイム可変駆動強度機能により、インバータの効率を向上できます。絶縁型ゲート・ドライバとテキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツの高制御性能 MCU は、緊密に統合された優れたリアルタイム・ペリフェラルを搭載しており、20,000RPM を超える速度でも効果的なトラクション・モーター制御を実現できます。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。

### 警告

テキサス・インスツルメンツは、このリファレンス・デザインをラボ環境のみで使用するものとし、一般消費者向けの完成品とはみなしておりません。

テキサス・インスツルメンツは、このリファレンス・デザインを高電圧電気・機械部品、システム、およびサブシステムの取り扱いに伴うリスクを熟知した有資格のエンジニアおよび技術者のみが使用するものとしています。

**高電圧！** 基板上は高電圧状態になっており、接触するおそれがあります。基板は、不適切に取り扱ったり適用したした場合に感電、火災、けがの原因となる電圧および電流で動作します。けがをしたり、物品を破損しないために必要な注意と適切な対策をもって機器を使用してください。

### 注意

電源を入れたままその場を離れないでください。

## 1.1 主なシステム仕様

表 1-1 に主なシステム仕様をまとめます。

表 1-1. 主なシステム仕様

パラメータ	仕様 (単位)	注
$P_{out}$	300kW	定格出力電力
$V_{DSmax}$	1200V	最大ドレイン・ソース電圧
$V_{DC}$	800V	推奨 DC バス電圧
$I_{DC}$	300A	DC バス電流
$f_{swmax}$	60kHz	ゲート・ドライバのバイアス電源に基づく
$I_L$	360A	AC 出力 RMS 電流
$L_{PL}$	5.3nH	DC リンク・コンデンサとバスバーを含む寄生インダクタンス
$C_{DC}$	300uF	DC リンク・コンデンサ
$L_{DC}$	3.5nH	DC バス・コンデンサ ESL
電力密度	32kW/L	
寸法	28cm x 29cm x 11.5cm	
Weight	6.2kg	
ボリューム	9.3L	
面積	812 cm <sup>2</sup>	
P	5bar	冷却剤の動作圧力
$\Delta P$	200mbar	圧力損失

- 絶縁型ゲート・ドライバの詳細については、[UCC5880-Q1](#) のデータシートを参照してください。
- マイクロコントローラの詳細については、[AM2634-Q1](#) および [TMSF280039C-Q1](#) のデータシートを参照してください。
- バイアス電源の詳細については、[UCC14240-Q1](#) のデータシートを参照してください。
- 内蔵モジュールの詳細については、[CAB450M12XM3](#) のデータシートを参照してください。
- 周囲温度が高い場合は、含まれている DC リンク・コンデンサの定格に応じて、DC リンク電圧と DC リンク電流をデレーティングする必要があります。詳細については、[FTCAP GmbH](#) から提供されている [1100V / 100μF CX100μ1100d51KF6](#) のデータシートを参照してください。
- 付属の冷却板は [Wieland MicroCool CP3012-XP](#) です。熱抵抗 (°C/W) および圧力損失 (バール) と流量 (リットル/分) の関係を計算するには、[Wieland MicroCool Inc.](#) が提供する [CP3012-XP](#) のデータシートを参照してください。
- 付属の電流センサ・ボードは、[LEM LF 510-S](#) を使用します。詳細については、[LEM USA Inc.](#) が提供する [LF 510-S](#) のデータシートを参照してください。

## 2 システム概要

### 2.1 ブロック図

図 2-1 に、主要なテキサス・インスツルメンツ部品を使用した、このリファレンス・デザインのブロック図を示します。

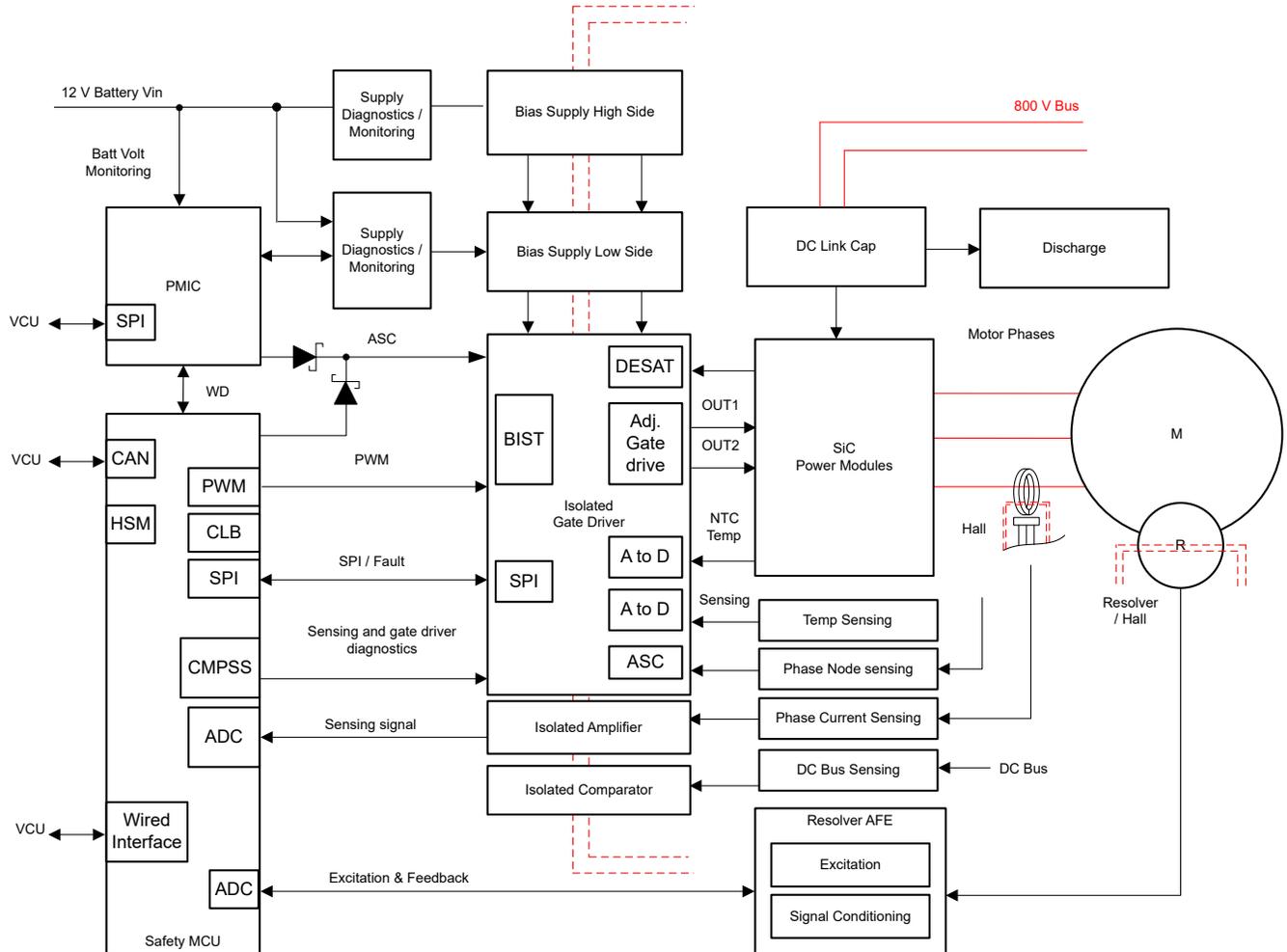


図 2-1. TIDM-02014 SiC インバータ・システムのブロック図

## 2.2 設計上の考慮事項

トラクション・システムの主な目的は、トラクション・モーターを効率的に駆動することです。トラクション・モーターは通常、制御帯域幅の広い誘導モーターまたは内部永久磁石同期モーター (IPMSM) です。このため、TIDM-02014 は C2000 リアルタイム制御 MCU を搭載し、モーターを駆動するためのフィールド・オリエンテッド・コントロール (FOC) 方式を実装しています。このデザインは、テキサス・インスツルメンツの Sitara™ AM263x MCU ベースの制御実装もサポートしており、機能安全要件をサポートしながら高いリアルタイム性能を実現できます。

SiC インバータの高効率動作を実現するため、UCC5880-Q1 機能安全に準拠した絶縁型ゲート・ドライバの設計が利用されます。高度な構成および保護機能に加えて、UCC5880-Q1 のリアルタイム可変ゲート駆動強度機能により、効率を最適化できます。ゲート・ドライブ・バイアス電源の設計には、絶縁型トランスとポスト・レギュレーションを内蔵した UCC14240-Q1 バイアス電源デバイスが使用されています。UCC14240-Q1 の厳格なレギュレーション機能により、動作中のデバイスの導通損失を最小限に抑えることができます。これらの設計により、ゲート・ドライブの BOM と PCB フットプリントを最大 30% 削減できます。

電力段の設計理念は、高電流容量で低インダクタンスの設計により最高の性能を達成する同時に、コストと複雑さを最小にすることを目標としています。この目標を達成するために、5 つの重要なパラメータを考慮します。第 1 に、SiC モジュールは電流密度が高く、比較的サイズが小さいため、熱伝達を最大にするために高性能のサーマル・スタックアップが実装されています。第 2 に、バスバー構造によって生じる浮遊インダクタンスは、低インダクタンスの平面をオーバーラップさせた構造を使用することで最小限に抑えられます。第 3 に、高周波スイッチング・ループを効果的に閉じるために、低インダクタンスでリップル定格の高いコンデンサを使用する必要があります。第 4 に、ゲート・ドライバの高速保護機能と高ノイズ耐性機能を活用して、SiC モジュールを効果的にスイッチングし、フォルト状態で最大の耐久性を実現します。最後に、電力段のエンジニアリングは、アセンブリ、製造、およびシステム・コストの複雑さを最小限に抑えることを目標としています。このインバータは、寸法 279mm x 291mm x 115mm、合計体積 9.3L であり、最大電力密度 32.25kW/L は同等のシリコン (Si) ベースのインバータの 2 倍以上です。

## 2.3 主な使用製品

このリファレンス・デザインは、以下のテキサス・インスツルメンツ・デバイスを使用しています。

### 2.3.1 UCC5880-Q1

UCC5880-Q1 は、機能安全に準拠した絶縁型ゲート・ドライバで、EV/HEV トラクション・インバータ・アプリケーションを対象としています。調整可能なゲート駆動強度、ブランキング時間、グリッチ除去、スレッシュホールド、機能イネーブルを SPI でプログラムできるフレキシビリティと障害処理機能により、UCC5880 は、あらゆる EV/HEV トラクション・インバータ・アプリケーションで使用されるさまざまな IGBT または SiC パワー・トランジスタをサポートできます。UCC5880-Q1 には、ほとんどのトラクション・インバータ・アプリケーションで必要とされるすべての保護機能が統合されています。また、20A のゲート駆動能力により外部ブースタ回路が不要になり、設計全体のサイズを縮小できます。内蔵のミラー・クランプ回路は、過渡イベント時にゲートをオフに保持し、内部 4A プルダウンを使用するか、外部 N チャネル MOSFET を駆動するように構成できます。高度な内部コンデンサ・ベースの絶縁テクノロジーにより、CMTI の性能を最大化すると同時に、放射エミッションを最小限に抑えます。

### 2.3.2 AM2634-Q1

AM263x Sitara™ Arm® マイクロコントローラは、次世代の産業用および車載用組込み製品の複雑なリアルタイム処理ニーズを満たすように開発されています。AM263x MCU ファミリーは、最大 4 つの 400MHz Arm® Cortex®-R5F コアを内蔵した複数のピン互換デバイスで構成されています。複数の Arm® コアを任意にプログラミングして、各種の機能安全構成用にロックステップのオプションで動作させることもできます。産業用通信サブシステム (ICSS) を使用すると、PROFINET IRT、TSN、EtherCAT® など (その他多数) の内蔵の産業用イーサネット通信、または標準的なイーサネット・コネクティブティやカスタム I/O インターフェイスを実現できます。

AM263x ファミリーは、高度なアナログ・モジュールを使用した高度モーター制御およびデジタル電源制御アプリケーション用に設計されています。

### 2.3.3 TMS320F280039C-Q1

TMS320F280039C-Q1 は C2000™ リアルタイム・マイクロコントローラ・ファミリーの 32 ビット DSP で、オンチップ・フラッシュまたは SRAM から実行される浮動小数点または固定小数点コードに対して 120MHz の信号処理性能を提供します。

C28x CPU は、浮動小数点演算ユニット (FPU)、三角関数演算ユニット (TMU) および VCRC (巡回冗長検査) 拡張命令セットによってさらに強化され、リアルタイム制御システムでよく使われる主要なアルゴリズムを高速化します。

CLA により、一般的なタスクの負荷の多くをメインの C28x CPU から取り除くことができます。CLA は独立の 32 ビット浮動小数点演算アクセラレータであり、CPU と並列に実行されます。さらに、CLA には独自の専用メモリ・リソースがあり、一般的な制御システムで必要となる主要なペリフェラルに直接アクセスできます。ANSI C のサブセット、およびハードウェア・ブレイクポイントやハードウェアによるタスク切り替えなどの主要な機能が標準でサポートされています。

### 2.3.4 UCC14240-Q1

UCC14240-Q1 は、トラクション・インバータ・モーター・ドライブ、産業用モーター・ドライブ、その他の高電圧 DC/DC コンバータの SiC または IGBT パワー・デバイスのゲート・ドライブに電源を供給するための高効率、低エミッションの絶縁型 DC/DC コンバータを内蔵しています。この DC/DC コンバータは、3000V<sub>RMS</sub> の基本絶縁膜全体で 1.5W を上回る電源を供給します。テキサス・インスツルメンツでは、新しい強化絶縁型デバイス UCC14341-Q1 も提供しています。このデバイスは 15V の入力を受け入れ、同様に最大 25V の調整可能な絶縁出力を供給します。最適化された BOM では、トラクション・インバータで一般的に利用可能な 15V レゾルバ・ルールに UCC14341-Q1 を直接接続できます。

### 2.3.5 UCC12051-Q1

UCC12051-Q1 は、5kV<sub>RMS</sub> の絶縁を備えた DC/DC パワー・モジュールであり、適切にレギュレートされた出力電圧のバイアス電源を必要とする絶縁回路に、高効率の絶縁電力を供給するよう設計されています。このモジュールは、独自のアーキテクチャによってトランスと DC/DC コントローラを統合しており、500mW (標準値) の絶縁電力を高効率かつ低 EMI で供給できます。UCC12051-Q1 は、システムの堅牢性を向上させるための保護機能を内蔵しています。このモジュールはイネーブル・ピン、同期機能、5V または 3.3V 安定化出力選択機能 (ヘッドルームを選択可能) も備えています。

### 2.3.6 AMC3330-Q1

AMC3330-Q1 は、高入力インピーダンスの完全差動高精度絶縁型アンプであり、DC/DC コンバータが内蔵されているため、低電圧側からの単一の 3.3V または 5V 電源を使用してデバイスに電源を供給できます。デバイスの入力段は、2 次デルタ・シグマ ( $\Delta\Sigma$ ) 変調器を駆動します。 $\Delta\Sigma$  変調器は、内部の基準電圧とクロック・ジェネレータを使用して、アナログ入力信号をデジタル・ビットストリームに変換します。ドライバ (「機能ブロック図」では TX) は、変調器の出力を、ハイサイドとローサイドの電圧ドメインを分離する絶縁膜を通過して伝達します。受信したビットストリームとクロックは同期されてローサイドの 4 次アナログ・フィルタで処理され、差動アナログ出力として供給されます。

### 2.3.7 TCAN1462-Q1

TCAN1462-Q1 は、ISO 11898-2:2016 高速 CAN 仕様と CiA 601-4 信号改善機能 (SIC) 仕様の物理層の要件を満たす高速 CAN トランシーバです。このデバイスは、ドミナントとリセッブのエッジで信号リングを低減し、複雑なネットワーク・トポロジで高いスループットを実現します。信号改善機能を活用すると、アプリケーションは 2Mbps、5Mbps、さらに複数の未終端のスタブを持つ大規模ネットワークで動作できるようになり、CAN FD (フレキシブル・データ・レート) の真のメリットを引き出すことができます。

このデバイスは、CiA 601-4 が規定するタイミング仕様も満たしており、通常の CAN FD トランシーバと比較して、はるかに厳密なビット・タイミング対称性を備えています。この結果、より大きなタイミング・ウィンドウを使用して正しいビットをサンプリングし、リングとビット歪みを本質的に持つ大きく複雑なスター・ネットワークでエラー・フリーの通信を実現できます。

### 2.3.8 ISO1042-Q1

ISO1042-Q1 は、ISO11898-2 (2016) 規格に準拠したガルバニック絶縁型 CAN (コントローラ・エリア・ネットワーク) トランシーバです。 $\pm 70V$  の DC バス障害保護機能を搭載し、 $\pm 30V$  の同相電圧範囲に対応しています。CAN FD モードで最高 5Mbps のデータレートに対応するため、Classic CAN よりはるかに高速でペイロードを伝送できます。耐圧 5000V<sub>RMS</sub> の二酸化ケイ素 (SiO<sub>2</sub>) 絶縁膜を採用しており、1060V<sub>RMS</sub> の動作電圧を実現しています。電磁両立性が大幅に強化されているため、システム・レベルの ESD、EFT、サージ、放射の規格に準拠できます。絶縁型電源と組み合わせて使用した場合、高電圧に対して保護し、バスからのノイズ電流がローカル・グランドに入り込むことを防止できます。ISO1042-Q1 デバイスには基本絶縁用と強化絶縁用のものがありますが、このリファレンス・デザインでは強化絶縁用のデバイスを使用しています。

### 2.3.9 ALM2403-Q1

ALM2403-Q1 は、レゾルバを使用したアプリケーションに最適な機能と性能を備えたデュアルパワー・オペアンプです。大出力電流を連続的に駆動できると同時に、デバイスのゲイン帯域幅が広く、スルーレートが大きいため、リゾルバの 1 次コイルの励起に必要な低歪みの差動大振幅励磁の実現に適しています。電流制限と過熱検出により、特にフォルトが発生しやすい有線によるアナログ信号の駆動時に、システム全体の堅牢性を高めることができます。

### 2.3.10 LM5158-Q1

LM5158x-Q1 は、広い入力電圧範囲に対応した非同期昇圧コンバータであり、ピーク電流制御モードを使用しています。このデバイスは、昇圧、SEPIC、フライバックのトポロジで使用可能です。デバイスは、最低 3.2V で起動できます。BIAS ピンが 3.2V を上回っていれば、最小 1.5V の入力電源電圧で動作できます。また内部 VCC レギュレータは、車載負荷ダンプ用に最大 60V (絶対最大定格 65V) での BIAS ピンの動作もサポートしています。スイッチング周波数は、外付けの抵抗を使用して 100kHz~2.2MHz の範囲で動的にプログラムできます。2.2MHz でのスイッチングにより、AM 帯域との干渉が最小化され、設計サイズの小型化と、高速な過渡応答を実現できます。このデバイスは、広い周波数範囲にわたって EMI を低減するのに役立つオプションのデュアル・ランダム・スペクトラム拡散機能を備えています。

### 2.3.11 LM74202-Q1

LM74202-Q1 は、双方向 FET と強化された保護回路を内蔵したダイオードです。LM74202-Q1 は、4.2V~40V で動作するすべてのシステムおよびアプリケーションに対して堅牢な保護を提供します。このデバイスには、バッテリー逆接続入力、逆電流、過電圧、低電圧、過電流、短絡保護が内蔵されています。高精度の過電流制限 (1A で  $\pm 5\%$ ) は、設計全体の入力電源を最小にするのに役立ちます。また、高速応答の短絡保護機能は、短絡が検出されたときに負荷を入力から即座に絶縁します。このデバイスでは、外付け抵抗を使用して、過電流制限スレッシュホールドを 0.1A~2.23A の範囲でプログラムできます。このデバイスは、バス電圧のブラウンアウトおよび過電圧保護を監視し、FLTb ピンをアサートしてダウンストリーム・システムに通知します。

## 2.4 システム設計理論

### 2.4.1 マイクロコントローラ

マイクロコントローラは、1 次制御ユニットとして、システムの中央に配置されています。テキサス・インスツルメンツの MCU デバイスが提供する幅広い機能を示すため、TIDM-02014 設計ではテキサス・インスツルメンツの C2000™ および Sitara™ MCU ファミリのデバイスをサポートしています。2 つのデバイス間の切り替えを簡素化するため、ピン互換性のある制御カード評価基板を使用しています。制御カードの機能について次に説明します。

#### 2.4.1.1 マイクロコントローラ – C2000™

F280039C controlCARD (TMDSCNCD280039C) は、F28003x デバイスについて学習し、試行するのに最適です。この controlCARD は、トラクション・インバータ、オンボード・チャージャ、DC/DC コンバータなど、厳しい条件が要求されるアプリケーションで動作可能な、適切にフィルタリングされた堅牢な設計を実現することを意図しています。オンボード・デバッグを搭載した F280039C controlCARD を使用すると、F28003x MCU デバイスの強力なリアルタイム機能を簡単に評価できます。

AM263x 制御カードと同様に、F280039C 制御カードは WolfSpeed メイン制御ボードに直接接続できます。ただし、制御カードを切り替えるときは、制御上で複数の抵抗を取り付けたり取りはずしたりする必要があることに注意してください。抵抗の変更の詳細については、[セクション 3.1](#) を参照してください。

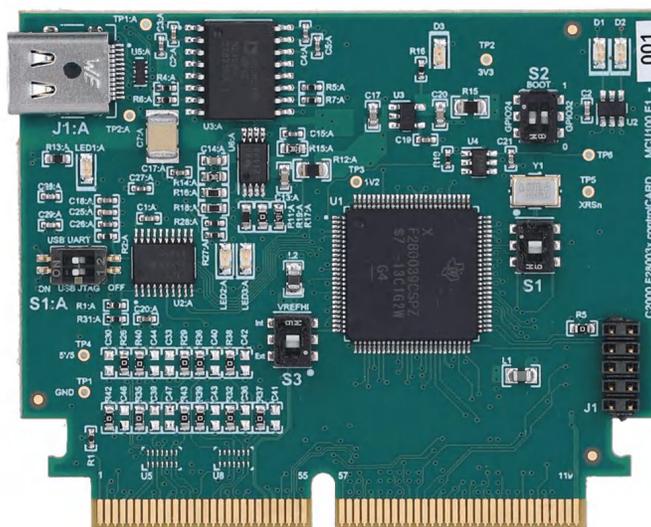


図 2-2. F280039C 制御カード

#### 2.4.1.2 マイクロコントローラ – Sitara™

AM263x 制御カード評価基板 (EVM) は、テキサス・インスツルメンツの Sitara™ AM263x シリーズのマイクロコントローラ (MCU) 用の評価 / 開発ボードです。この EVM には、プログラミングおよびデバッグ用のオンボード・エミュレーションが搭載され、ボタンや LED を備えたシンプルなユーザー・インターフェイスを利用できるため、AM263x MCU でのトラクション・インバータの開発を簡単に始めることができます。制御カードを使用すると、ヘッダー・ピンからキーにアクセスして、迅速にプロトタイプを製作できます。

この制御カードは Wolfspeed メイン制御ボードに直接接続でき、ソフトウェアで包括的にサポートされているため、トラクション・インバータの設計期間を短期間にすることができ、AM263x MCU に組み込まれている性能と統合性を最大にすることができます。



図 2-3. AM263x Sitara™ 制御カード

## 2.4.2 絶縁バイアス電源

図 2-4 の回路図に示されているように、UCC14240-Q1 DC/DC コンバータ・モジュールは単一の 24V (P24V) 入力で作動し、デュアル、+15V (VCC2)、-4V (VEE2)、3kV RMS 絶縁型バイアス電源電圧レールを UCC5880-Q1 絶縁型ゲート・ドライバに供給するように構成されています。VCC2 および VEE2 は抵抗分圧器 R13、R19、R15、R20 によりプログラムされ、 $\pm 1.3\%$  以内に厳密に調整されており、Wolfsped XM3、SiC ハーフブリッジ・モジュールの推奨に従って +15V および -4V を供給します。デジタル・ホストから UCC14240-Q1 ENA ピンをアクティブ High 状態にするために必要なイネーブル信号 (EN\_PS) を最初に供給すると、スタートアップが開始し、VCC2 と VEE2 がソフトスタートします。その後、UCC14240-Q1 がアクティブ Low の LVTTTL 互換パワー・グッド信号 (N\_PG) を供給し、P24V が 21V、UVLO ターンオン・スレッシュホールドを上回り、VCC2 と VEE2 がそれぞれ設定レギュレーション目標値の 90% を超えていることをホストに通知します (VCC2 > 13.5V および VEE2 > 3.6V)。ホストと UCC14240-Q1 の間のこの接続により、UCC5880-Q1 ゲート・ドライバに十分なバイアス電圧が印加され、インバータのスイッチングを安全に開始できるようになります。

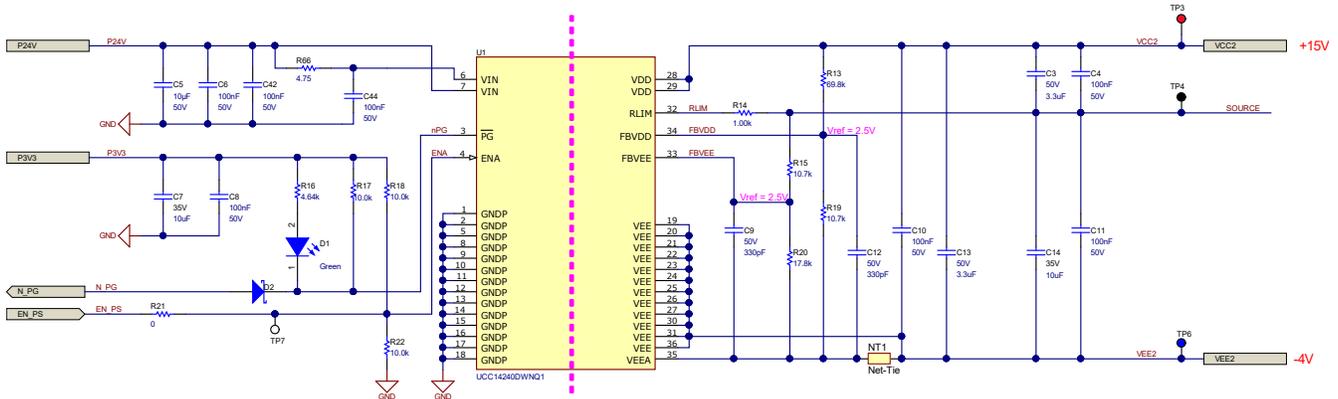


図 2-4. UCC14240-Q1 バイアス電源の回路図

## 2.4.3 電源ツリー

### 2.4.3.1 はじめに

制御ボードには、システムのすべての機能を実行するための完全な電源ツリーが含まれています。パワー・ツリーは、以下の機能に電源を供給します。

- すべてのオンボード・ペリフェラル
- ゲート・ドライバ・ボード
- MCU 制御カード (C2000 ベースまたは AM263x ベースの両方)
- 内部および外部センサ

外部オフライン DC アダプタは、ボードと組み合わせて使用することを想定しています。アダプタは、12VDC 公称 (8~16VDC) 3.3ADC として指定する必要があります。

電源は、バレル・ジャック・コネクタを使用して 2mm のセンター・ピン J100 に接続します (部品のデータシートを参照)。

2.4.3.2 電源ツリーのブロック図

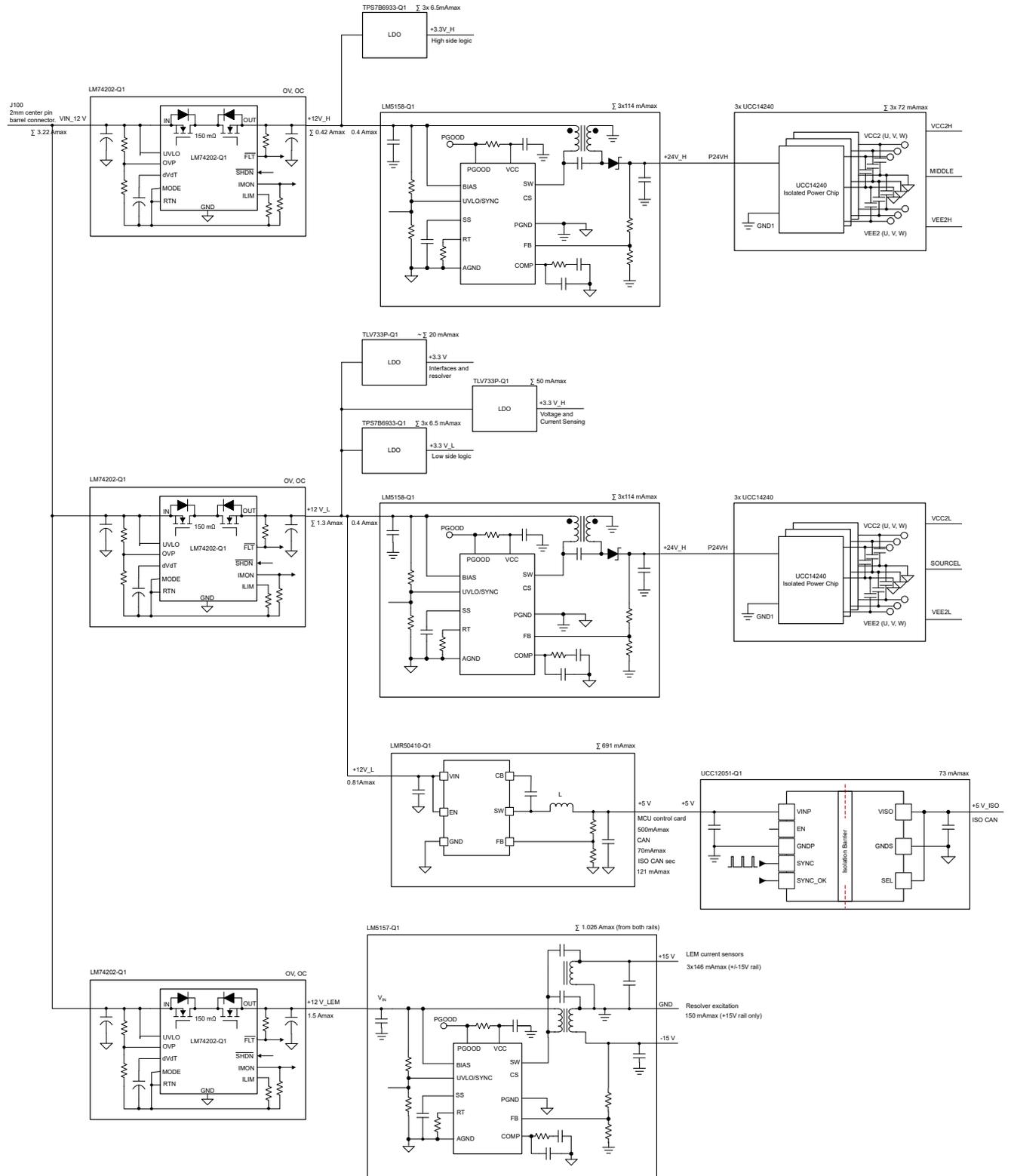


図 2-5. 電源ツリーのブロック図

### 2.4.3.3 12V の分配と制御

12V ドメインは、3 つの独立したレールに分配されます。

表 2-1. 12V の分配と制御

レール	レギュレータ	負荷	最大電流
+12V_H	LM5158-Q1 ベースの SEPIC	ハイサイド 24V ドメイン	0.4A
	TPS7B6933-Q1 LDO	ハイサイド 3.3V ロジック	0.02A
+12V_L	LM5158-Q1 ベースの SEPIC	ローサイド 24V ドメイン	0.4A
	TPS7B6933-Q1 LDO	ローサイド 3.3V ロジック	0.02A
	TLV733P-Q1 LDO	高電圧センシングと電流センシングのシグナル・コンデイショニング	0.05A
	TLV733P-Q1 LDO	デジタル・インターフェイスとレゾルバ・フロント・エンド	0.02A
	LMR50410-Q1 Simple Switcher®	5V 電源ドメイン	0.81A
+12V_LEM	LM5157-Q1 ベースの SEPIC	LEM 電流センサ・モジュール	1.5A
		レゾルバ励起	

これらのレールは、LM74202-Q1 理想ダイオードを使用して分離および保護されています。

LM74202-1 の主な機能は、過電圧 (OV) 保護と短絡保護を提供することです。デバッグや実験の目的で、プログラミング USB ケーブルなど、異なる電源から電源電圧が供給されたときに、ロジック信号 (Power\_EN\_LoadSW) を使用して MCU から LM74202-Q1 を制御できます。

### 2.4.3.4 ゲート・ドライブ電源

絶縁型ゲート・ドライブ・ユニット (GDU) (UCC5880-Q1) の低電圧ドメインには、TPS7B6933-Q1 LDO から電源を供給します。GDU の高電圧 (HV) ドメインには、UCC14240-Q1 絶縁型 DC/DC モジュールを使用して電源を供給します。これらのモジュールは、小型であることと使いやすいことから選択されています。

UCC14240-Q1 で生成される電圧は、合計 19V に設定されます ( $V_{CC2} = 15V$  および  $V_{EE2} = -4V$ )。高電圧の負極は、UCC14240-Q1 の仮想グラウンドです。

各 UCC14240-Q1 DC/DC モジュールの高電圧側の最大消費電力は、 $f_{SWmax} = 30kHz$ 、 $C_L = 100nF$  のワーストケース・スイッチング条件として推定できます。

$$P2 = f_{SWmax}(V_{CC2} - V_{EE2})^2 C_L + (V_{CC2} - V_{EE2}) I_{CCq2} \quad (1)$$

UCC5880-Q1 の 2 次側静止電流は、データシートに  $I_{CC2q} = 15mA$  と記載されています。これにより、2 次側の消費電力は 1.368W と計算されます。効率が 50% だとすると、これは各 UCC14240-Q1 の 24V 入力側で 114mA の消費電流に相当します。

これらの UCC14240-Q1 DC/DC モジュールは、事前安定化された 24V を必要とします。24V のプリレギュレータは、結合インダクタを持つ LM5158-Q1 ベースの SEPIC として実装されています。SEPIC トポロジは、適切な入力電圧範囲をサポートしています。LM5157/8-Q1 コンバータは、汎用性の高さやランダム・スペクトラム拡散機能によるノイズ耐性から、この設計に使用されています。

電源設計の部品値は、SEPIC 用の LM5158 クイック・スタート・カリキュレータ・ツールを使用して計算されています。表 2-2 に、電源の主な入力パラメータを示します。

表 2-2. ゲート・ドライブ電源用 SEPIC コンバータの設計パラメータ

パラメータ	値			
	最小値	標準値	最大値	単位
V <sub>INPUT</sub>	8	12	16	V
f <sub>sw</sub>		435		kHz
V <sub>LOAD</sub>		24		V
I <sub>LOAD</sub>		0.35		A

各 24V SEPIC は、3 個の UCC14240-Q1 に電源を供給するため、I<sub>LOAD</sub> = 0.35A と記載されています (図 2-5 を参照)。

#### 2.4.3.5 5V 電源ドメイン

5V 電源には、LMR50410-Q1 Simple Switcher® が搭載されています。電源は主に、HSEC PCB コネクタに接続されている MCU 制御カードに電源を供給します。

LMR50410-Q1 の最大出力電流は 1A で、電力バジェットは 10W です。効率は 90% で、最大電力の 12V 電源レールから約 0.92A を引き込みます。すべての分岐における負荷電流の現実的な推定値を図 2-5 に示します。

想定されている MCU 制御カードのうち、AM2634 制御カードは消費電力が大きいので、電力バジェットは AM2634 制御カードの消費電力推定値に基づいて決定されます。

未使用のペリフェラルがすべてディセーブルの場合、AM2634 ベースの制御カードの消費電力は平均 2.5W です。5V 電源ドメインには、さまざまな使用事例や動作プロファイルをサポートするのに十分なマージンがあります。

CAN インターフェイスは 70mA を消費し、絶縁型 CAN は 122mA を消費するので、5V レールからの合計は 192mA となります。絶縁型 CAN インターフェイスには、UCC12051-Q1 DC/DC パワー・モジュールを使用して電源を供給します。このモジュールは、5V および 5kVrms の絶縁時に最大 500mW の電力を供給します。ISOCAN1042-Q1 による絶縁側の負荷が 73mA の場合、効率が 60% であれば 1 次側で 122mA が得られると予測されます。

#### 2.4.3.6 電流および位置センシング電源

電流および位置センシング (レゾルバ) には、+12V の V<sub>LEM</sub> 電源レールから電源を供給します。LEM LF 510-S 電流トランスデューサには、正と負 15V の対称電源が必要です。

±15V 電源からの 1 つの電流測定チャンネルの消費電流は、次のように定義されます (詳細については LEM LF 510-S のデータシートを参照)。

$$I_{CCLEM}[mA] = 44 \text{ mA} + 0.2 I_{MEAS}[A] \quad (2)$$

ここで、44mA はトランスデューサの静止電流、I<sub>MEAS</sub> は測定電流です。ピーク測定電流によって、最大消費電力が決まります。この例では、最大 509A のピーク測定電流を想定しています (回路図の注を参照)。これは、146mA の消費電流に相当します。

+15V レールは、レゾルバ励起アンプに電源を供給します。消費電流はレゾルバのタイプによって異なります。この機能の推定電流バジェットは、+15V レールから 150mA です。

LM5157-Q1 を使用した対称 15V 電源を供給するため、デュアル出力 SEPIC トポロジが選択されています。同様に、LM5158-Q1 は Vin の範囲が広いコンバータであり、ランダム・スペクトラム拡散によりノイズ性能が向上しています。LM5157-Q1 は、直列に接続された 2 つの独立した SEPIC 段を同時に駆動します。LM5157/58 計算スプレッドシートを使用して部品を計算するためには、合計 I<sub>LOAD</sub> を決定する必要があります。V<sub>LOAD</sub> = 15V である場合、電流トランスデューサの消費電力を 2 倍にする必要があります。これは 2 つの駆動分岐を表します (±15V を生成)。I<sub>LOAD</sub> は次のように計算できます。

$$I_{LOAD} = 150 \text{ mA} + 2 \times 3 \times 146 \text{ mA} = 1026 \text{ mA} \quad (3)$$

ここで、係数 3 は電源に接続されている 3 つのチャンネルを表し、150mA はレゾルバ励起の電力バジェットを表します。

計算スプレッドシートでの部品の計算には、以下のパラメータが使用されています。

表 2-3. 電流および位置センシング回路の SEPIC コンバータ設計パラメータ

パラメータ	値			
	最小値	標準値	最大値	単位
$V_{INPUT}$	8	12	16	V
$f_{sw}$		435		kHz
$V_{LOAD}$		15		V
$I_{LOAD}$		0.35		A

### 3 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、テスト結果

#### 3.1 ハードウェア要件

このセクションでは、ハードウェアの詳細について解説し、ボード上のさまざまなセクションと、この設計ガイドで説明されているテスト用にそれらを設定する方法について説明します。

##### 3.1.1 ハードウェア・ボードの概要

図 3-1 に、アSEMBLされたインバータ・システムの機能セクションを示します。各セクションのハードウェアについて、この後詳細に説明します。

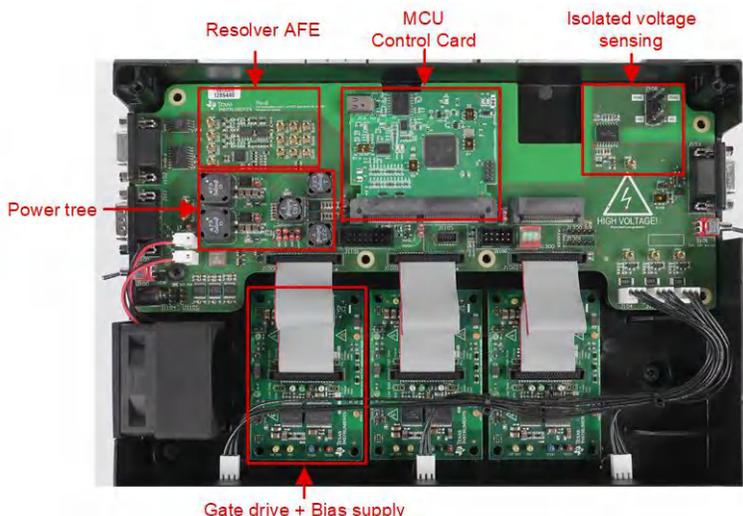


図 3-1. TIDM-02014 インバータ・システムの機能セクション

##### 3.1.1.1 制御ボード

制御ボードには MCU 制御カードを搭載でき、補助電源および位置、電圧、電流のセンシング、通信のためのインターフェイスを提供します。制御ボードはゲート・ドライブとバイアス電源ボードとのインターフェイスとして機能し、MCU とゲート・ドライブ間に電源および SPI 接続を提供します。制御ボードには制御カードを搭載できるため、テキサス・インスツルメンツの AM263x MCU と TMS320F280039C MCU を使用して、同じボードで TIDM-02014 システムをテストできます。ただし、これら 2 つの構成の間で、複数の 0R 抵抗を変更する必要があることに注意してください。表 3-1 に、変更する抵抗を示します。

表 3-1. AM263x と F280039C 構成の抵抗の変更

MCU 制御カード	取り付け	取りはずし
F280039C	R1110, R1113, R1116, R1118, R1120, R1121, R1126, R1127	R1109, R1114, R1115, R1125, R1123, R1124, R1122
AM263x	R1109, R1115, R1118, R1122, R1123, R1124, R1125	R1110, R1113, R1114, R1116, R1120, R1121, R1126, R1127

### 3.1.1.2 MCU 制御カード – Sitara™

図 3-2 に、AM263x 制御カードへの主要なインターフェイスと接続を示します。

AM263x 制御カードのピン配置は、制御カードのユーザー・ガイドに記載されています。

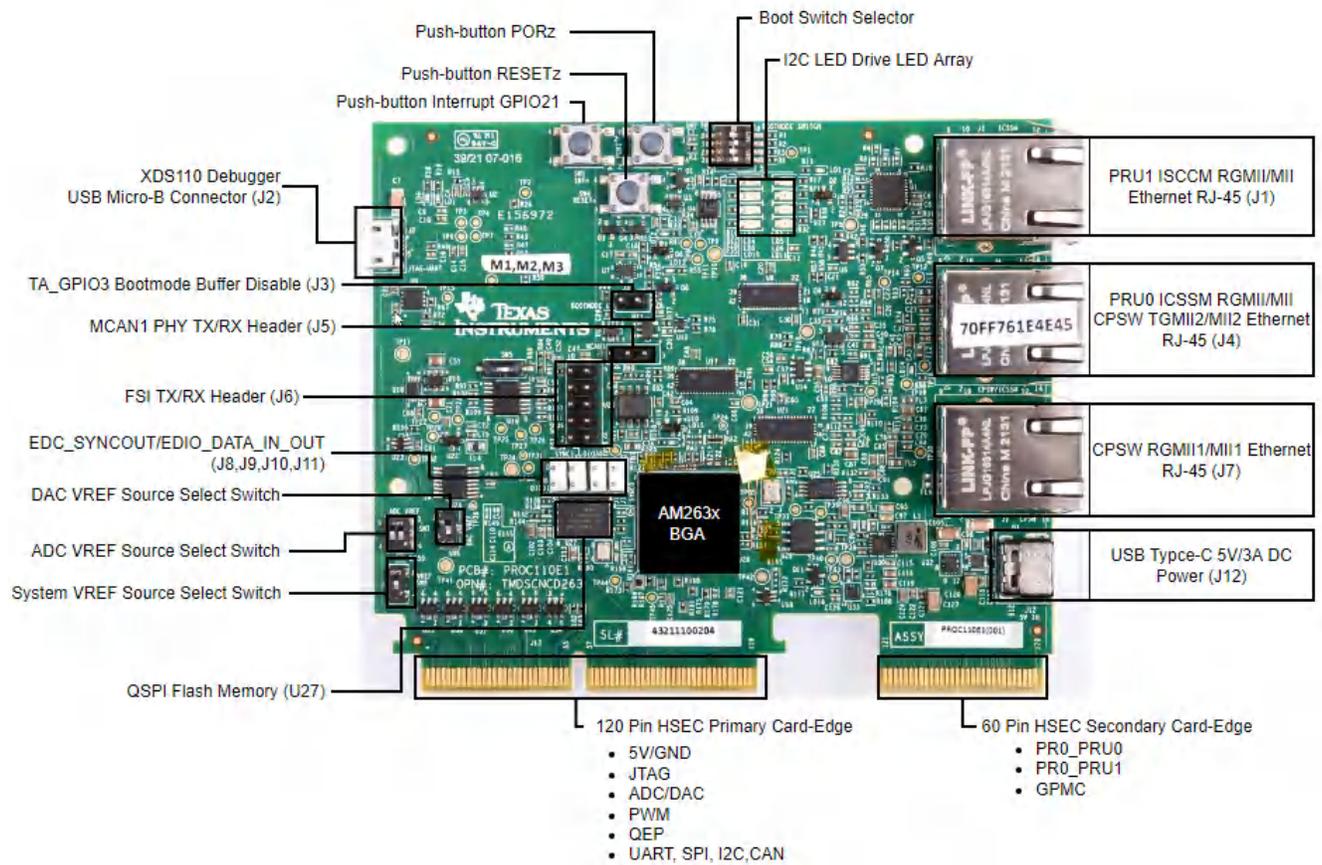


図 3-2. AM263x 制御カードのハードウェア説明

### 3.1.1.3 MCU 制御カード – C2000™

図 3-3 に、F280039C 制御カードの部品と対応する機能を示します。

基板の構成とデバッグの詳細については、[制御カードのユーザー・ガイド](#)を参照してください。

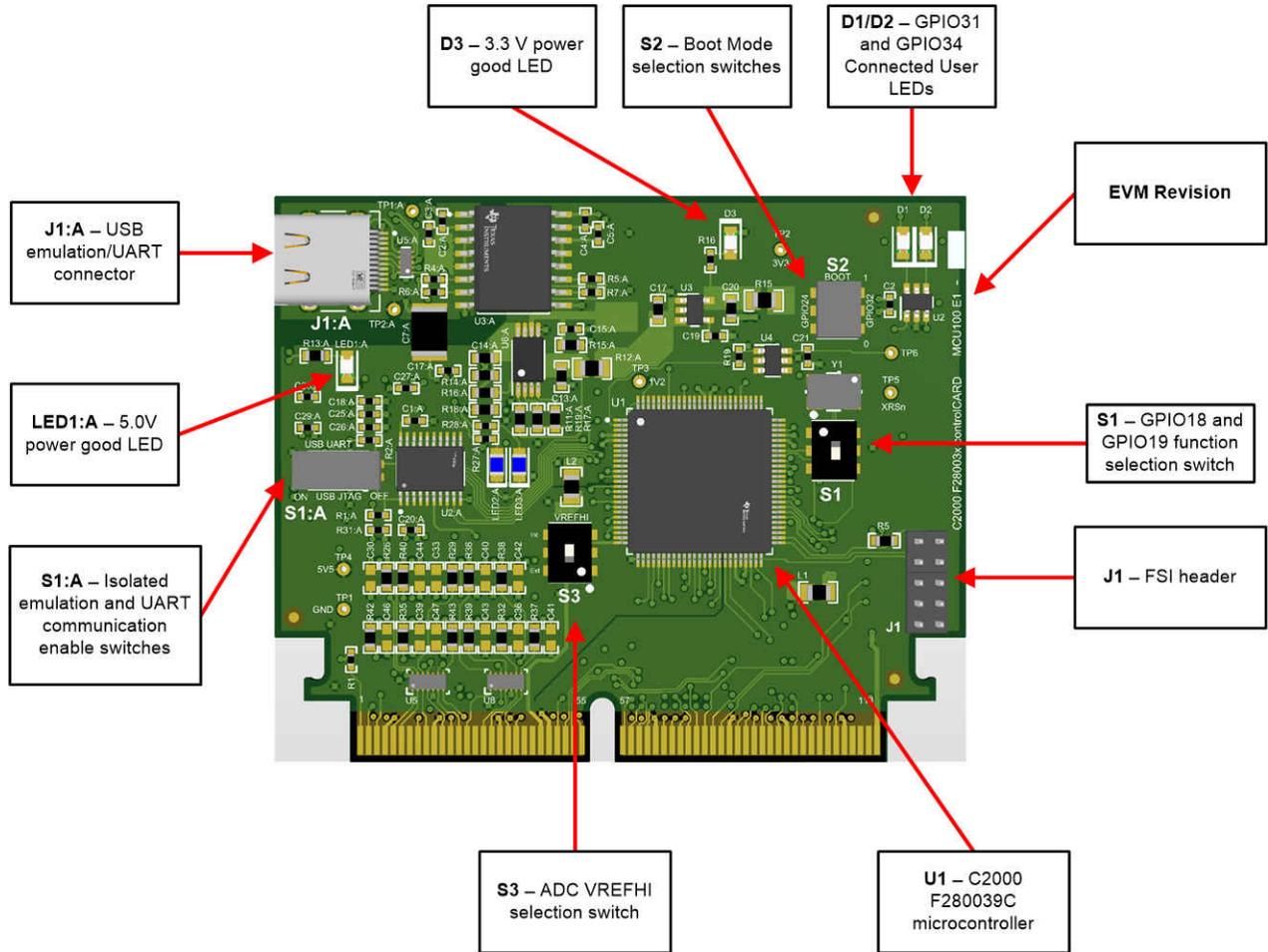


図 3-3. F280039C 制御カードのハードウェア・セクション

### 3.1.1.4 ゲート・ドライバとバイアス電源ボード

図 3-4 に、ゲート・ドライバとバイアス電源ボード上の部品とアクセス可能なテスト・ポイントを示します。J9 コネクタのピン配置については、表 3-2 を参照してください。

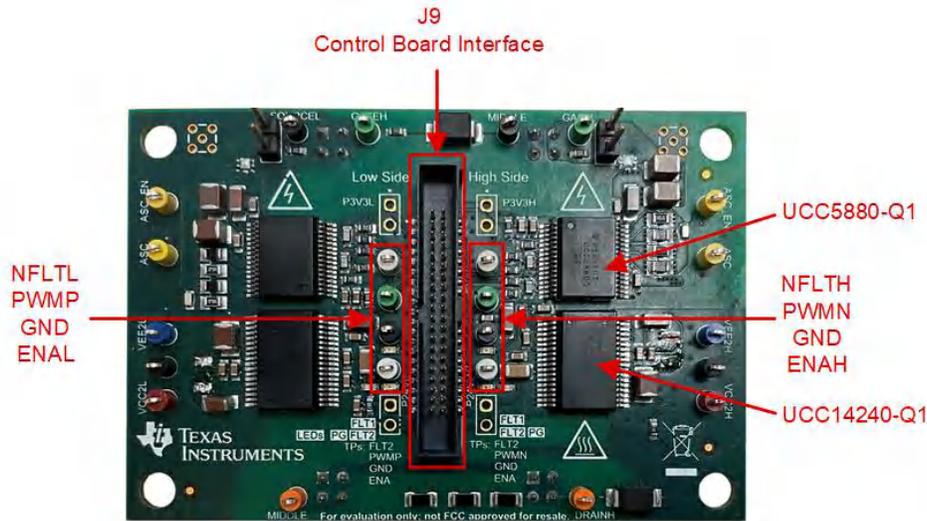


図 3-4. ゲート・ドライバとバイアス電源ボード

表 3-2. コネクタ J9 のピン配置

ピン	信号	ピン	信号
1	P3V3H_T	2	GND
3	PV3VL_T	4	GND
5	SDIL_T	6	NCSH_T
7	NCSL_T	8	SDOH_T
9	GND	10	CLK
11	GND	12	PWMN
13	GND	14	PWMP
15	GND	16	GND
17	ASCL_T	18	N_FLT2H_T
19	GND	20	N_FLT1H_T
21	GD2L_T	22	GD0H_T
23	GD1L_T	24	GD1H_T
25	GD0L_T	26	GD2H_T
27	GND	28	ASC_EN
29	N_FLT1L_T	30	ASCH_T
31	N_FLT2L_T	32	GND
33	EN_PSL_T	34	N_PGH_T
35	N_PGL_T	36	EN_PSH_T
37	P24VH_T	38	GND
39	P24VL_T	40	GND

### 3.1.1.5 DC バス電圧センス

DC バス電圧の電圧センスは、放電 PCB とコントローラの底面にあるコネクタの間にあるボード間コネクタにより接続されます。これにより、コントローラ・アプリケーションで DC バス電圧を監視できます。コントローラのコネクタ J8 には最大限のバス電圧が存在し、分圧器を使用して降圧され、ADC 入力に達する前にフィルタ処理されます。0~1200V の DC バス電圧信号は、0~3V の ADC 電圧にスケールアップされます。

### 3.1.1.6 SiC パワー・モジュール

#### 3.1.1.6.1 XM3 SiC パワー・モジュール

Wolfspeed の XM3 モジュールは、高性能で使いやすい新しいパッケージを作成することで、SiC パワー・モジュールを簡素化するように設計されています。Wolfspeed は、高性能の次世代モジュールを開発しました。このモジュールは使いやすく、市販の 650~1700V Wolfspeed C3M™ SiC MOSFET のすべてのサイズで最大の性能を達成するように最適化されています。このモジュールは、小さなフットプリント (53 x 80mm) で大電流 (300~600A 超) を伝送する能力を備えており、シンプルなバス接続と相互接続が可能な端子配置になっています。インダクタンスが小さく、均等に分配されたレイアウトであるため、高品質のスウィッチング・イベントが得られ、モジュールの内部と外部の両方の発振が最小限に抑えられます。このモジュールの浮遊インダクタンスはわずか 6.7nH です。このリファレンス・デザインで低インダクタンスのバス機能とコンデンサを組み合わせると、合計ループ・インダクタンスが 12nH となり、多くの標準的なパワー・モジュール・パッケージの内部浮遊インダクタンスよりも低くなります。XM3 プラットフォームは、図 3-5 に示すように、業界で一般的に使用されているパッケージと比較して、体積は 40%、フットプリントは 45% であり、電力密度の高いシステム向けのよりコンパクトな電源モジュールです。表 3-3 に、各 3 相インバータのリファレンス・デザインに含まれる XM3 モジュールのバリエーションを示します。



図 3-5. XM3 (左)、62mm (中央)、および EconoDUAL™ (右) のサイズ比較

表 3-3. XM3 パワー・モジュールの型番

リファレンス・デザイン	モジュールの型番
CRD300DA12E-XM3	C4B450M12XM3
CRD250DA12E-XM3	C4B425M12XM3
CRD200DA12E-XM3	C4B400M12XM3

#### 3.1.1.6.2 モジュールの電源端子

XM3 パワー・モジュールの電流ループは、大きく低プロファイルで、スイッチ位置の両端でインピーダンスが等価になるように、デバイス間に均等に分散されています。図 3-6 に示すように、電源端子は垂直にオフセットされており、DC リンク・コンデンサとモジュールの間のバス・バーを曲げ、結合、スタンドオフ、複雑な絶縁を必要とせずに、モジュールまでラミネートできるようになっています。図 3-7 に、代表的な 3 相インバータのバス接続を示します。これにより、DC リンク・コンデンサから SiC デバイスまで、電源ループ全体で低インダクタンスが実現されます。パッケージの寄生インダクタンスは、デバイスなしの XM3 モジュールを Keysight E4990A インピーダンス・アナライザに接続して抽出されています。10MHz で測定された V+ から V- への電源ループ・インダクタンスは 6.7nH です。

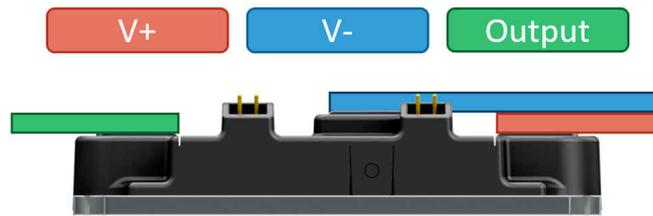


図 3-6. 非平面の電源リードを示した XM3 モジュールの側面図

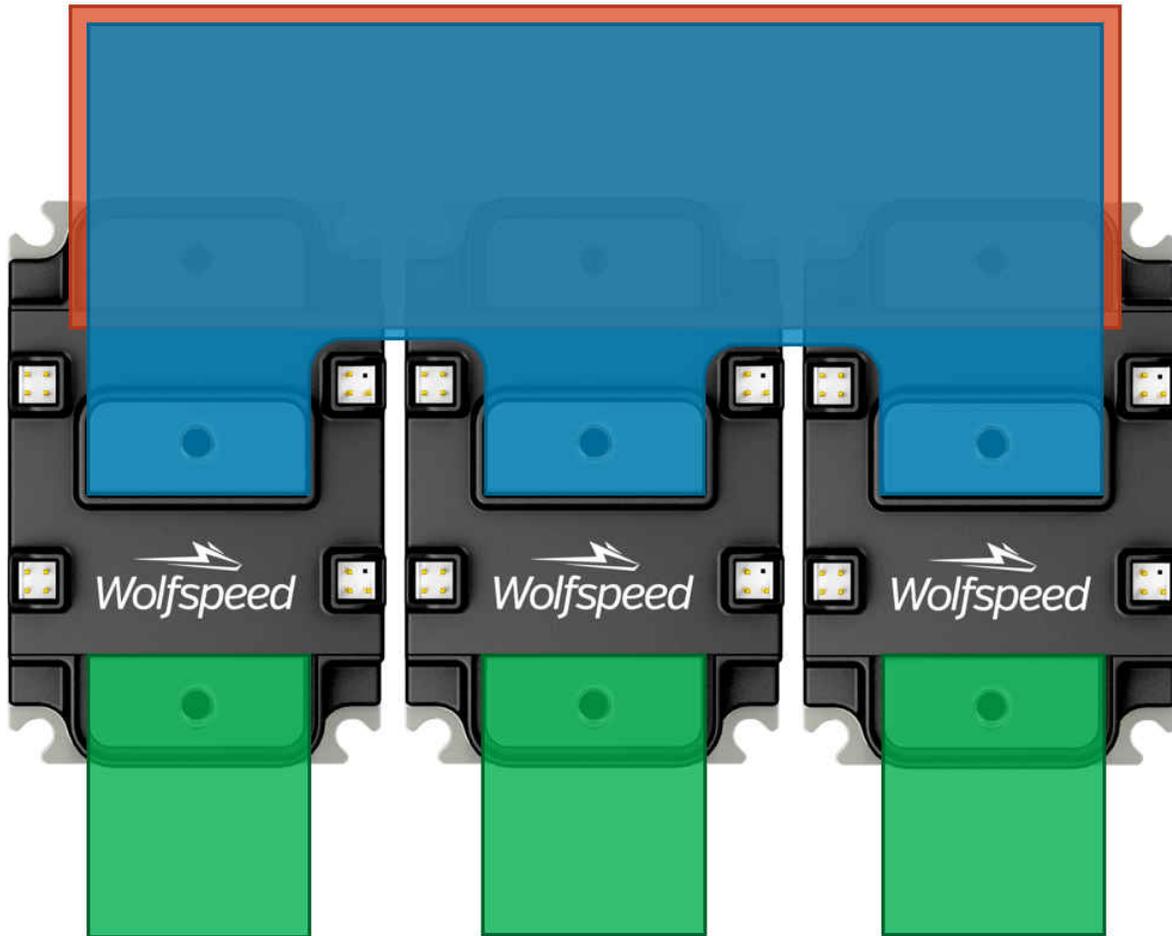


図 3-7. 3 相バス接続のレイアウト図

### 3.1.1.6.3 モジュールの信号端子

XM3 モジュールの信号ピンは、図 3-8 に示すように、機能別にグループ化された 4 組のオス・ヘッダー・ピンで構成されており、モジュールの左右に配置されています。左側には、ハイサイドとローサイドのスイッチ位置に対応するゲート・ピンと、それらに関連するソース・ケルビン・ピンがあります。右上には DESAT / 過電流ピンがあります。これは、V+ 電源端子に内部接続されており、VDS を測定するハイサイド・ゲート・ドライバ保護回路の接続ポイントとなります。右下には、内部の負温度係数 (NTC) 温度センサ用のピンがあります。NTC は、下側のスイッチ電源デバイスの近くにある電氣的に絶縁された基板パッド上に配置されており、アプリケーションの要件に応じて追加のガルバニック絶縁が必要になる場合があります。UCC5880-Q1 ゲート・ドライバを使用すると、NTC 測定信号を最大 5.7kV まで絶縁できます。右側の信号コネクタにはどちらも接続されていないピンが 1 つあり、ゲート・ドライバをキー付きにして不適切な取り付けを防止できます。

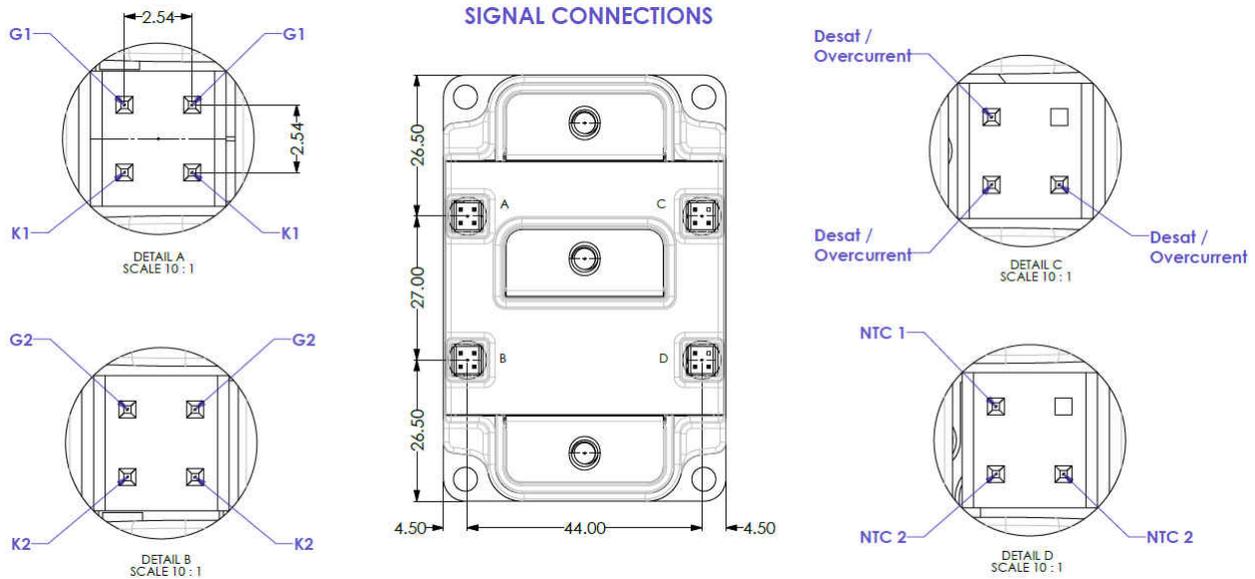


図 3-8. XM3 モジュールの信号端子のピン配置

#### 3.1.1.6.4 内蔵 NTC 温度センサ

パワー・モジュールに内蔵されている NTC 温度センサの出力は、絶縁型デジタル信号によりコントローラにフィードバックされます。この信号は、周波数が変化する 50% デューティ・サイクルの方形波です。温度センサは、電源デバイスのできるだけ近くに配置すると同時にデバイスから電氣的に絶縁することで、ベースプレートの近似温度を示します。NTC で検出された温度は、SiC MOSFET の接合部温度と大きく異なり、正確な接合部温度測定としては使用できません。3 つの XM3 モジュールの NTC フィードバック信号をコントローラを使用して測定する方法は 2 つあります。1 つ目は、拡張キャプチャ (eCAP) ペリフェラルを使用して、差動レシーバから直接送信される信号の周波数をデジタル測定する方法です。NTC 信号周波数と NTC 温度の関係を図 3-9 および表 3-4 に示します。2 つ目は、周波数信号をフィルタ処理し、コントローラの ADC で測定できるアナログ信号に変換する方法です。アナログ電圧の測定値は、周波数が 4.6kHz のときは 0.38V、周波数が 30.1kHz のときは 2.5V です。

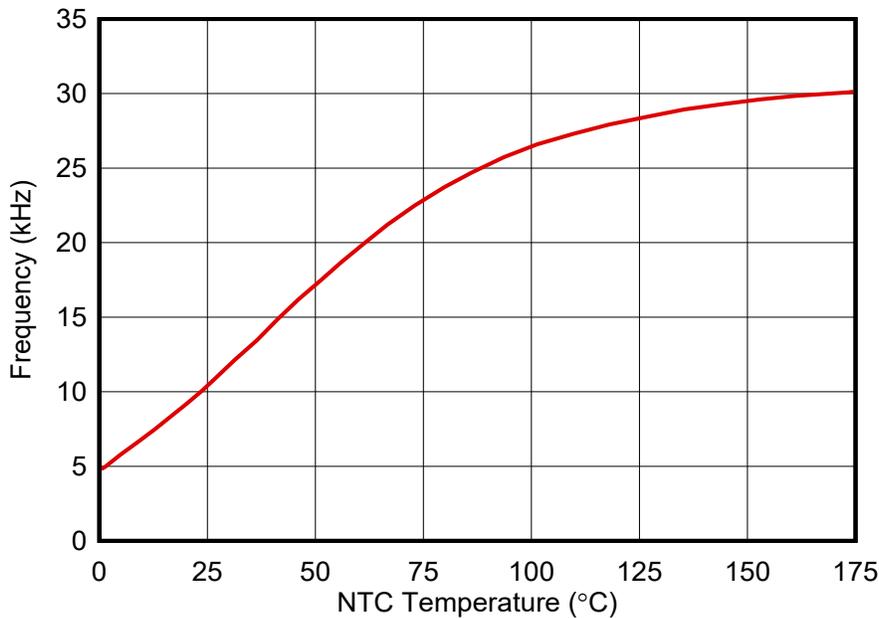


図 3-9. NTC 温度と信号周波数との関係

**表 3-4. NTC の温度、抵抗、周波数の相関関係**

NTC 温度 (°C)	NTC 抵抗 (Ω)	周波数出力 (kHz)
0	13491	4.6
25	4700	10.3
50	1928	17.1
75	898	22.8
100	464	26.4
125	260	28.3
150	156	29.5
175	99	30.1

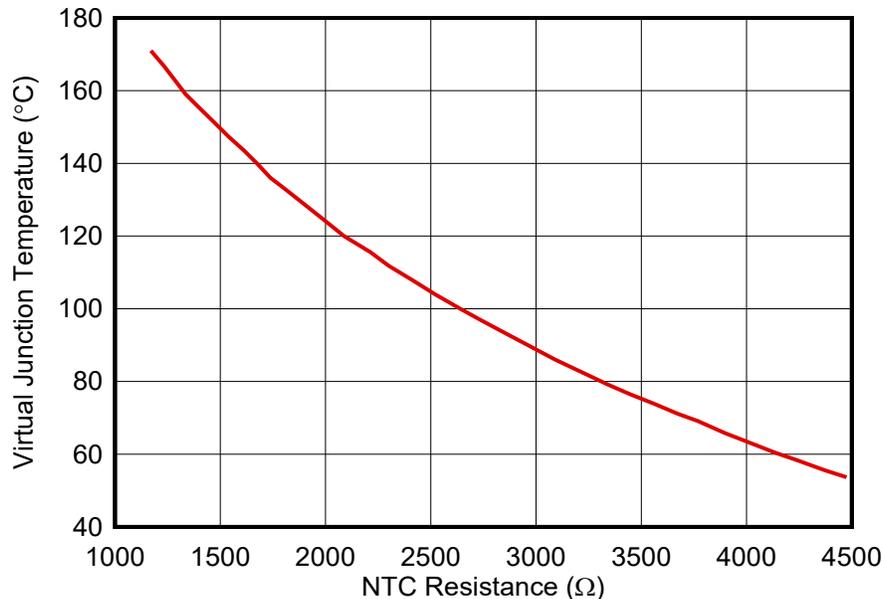

**図 3-10. CAB450M12XM3 仮想接合部温度 ( $T_{VJ}$ ) と 25°C の冷却剤を使用した NTC 抵抗との関係**

図 3-10 に、CAB450M12XM3 モジュールの NTC 抵抗 ( $R_{NTC}$  (Ω)) と仮想接合部温度 ( $T_{VJ}$ ) のマッピングを示します。これは、次の式を使用して計算されます。

$$T_{VJ} = -87.12 \times \ln(R_{NTC}) + 786.14 \quad (4)$$

コントローラ PCB 上に追加の温度センサが 1 つ搭載されており、リファレンス・デザイン・ケース内の周囲温度を測定できます。この温度センサは、10kΩ の NTC 表面実装サーミスタと、分圧器を形成する 10kΩ の固定抵抗で構成されています。温度が上昇すると、分圧器の midpoint の電圧も上昇します。この電圧はローパス・フィルタで処理され、緩やかに変化する温度からの高周波ノイズを除去します。この電圧信号  $V_T$  をサーミスタの温度 (ケルビン) に変換するには、次の式を使用します。

$$T = \left( \frac{\ln(3.3/V_T - 1)}{3900} + \frac{1}{298.15} \right)^{-1} \quad (5)$$

### 3.1.1.7 ラミネート・バス・コンデンサと DC バス・コンデンサ

モジュールの電源端子の垂直オフセットにより、バスバーの設計をシンプルで高コスト効率でありながら、電源ループのインダクタンスを小さくすることができます。低インダクタンスのバスバーを使用して、(バスバーの下にある) DC リンク・コンデンサをパワー・モジュールに接続します。この場合も、オフセット電源モジュール端子により、曲げやスタンドオフのないバスバー・アセンブリが可能で、コストを削減し、オーバーラップを最大限にすることができます。これらのコンデンサは、ループ全体の面積を最小化するため、できるだけ近くに配置します。図 3-11 に示すように、バスバーは、モジュールとコンデンサの V+ 端子を接続する 1 枚の平板、インシュレータ、モジュールの高くした V- 端子に接続された 2 枚目の平板、お

よびコンデンサ端子用のコイニングまたはスペーサーを持つコンデンサで構成されています。この構造はシンプルで、最低限の工程で製造できるため、コストとリードタイムを削減できます。

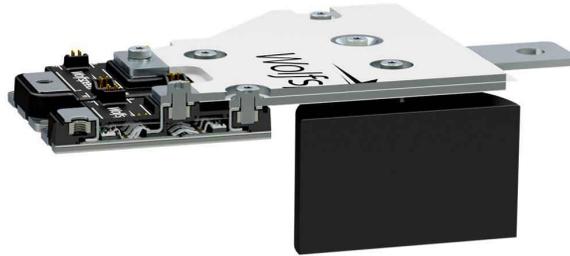


図 3-11. 電源ループを示すラミネート・クロスバー構造の側面図

最適なコンデンサの向きは、2層 PCB として製造されたバス接続ジオメトリの 3 つのプロトタイプインダクタンスを測定することにより決定されています。各プロトタイプ間で、コンデンサ端子を垂直に回転、水平に回転、および 45 度の角度で回転させました。水平の配置でコンデンサを取り付けたときの相対インダクタンスが最低となっており、ラミネート・バス接続に使用されます。

フィルム・コンデンサには、高周波パワー・ループを閉じ、ローカル・エネルギーを蓄積するという 2 つの目的があります。これらの役割を果たすため、バス・コンデンサは低インダクタンスでリップル電流定格が高いものである必要があります。このリファレンス・デザインでは 3 つの Fischer & Tausche® CX100µ1100d51KF6 コンデンサを使用しており、それぞれの定格は 100A のリップル電流および 100µF です。1100V の電圧定格は、900V の最大 DC バスで動作させるには十分であり、高いスイッチング・レートによるピーク・オーバーシュートを許容できます。各コンデンサの等価直列インダクタンス (ESL) は 10.5nH です。これら 3 つのコンデンサを使用すると、コンデンサ・バンクの合計 ESL が 3.5nH に低下します。これは、DC バス接続およびコンデンサに計測された合計インダクタンスが 5.3nH の場合、バス接続自体のインダクタンスは 1.8nH であるということです。DC バスのインダクタンス 5.3nH と XM3 モジュールの電源ループ・インダクタンス 6.7nH を加えると、電源ループ・インダクタンスは 12nH となり、多くの標準フットプリント・モジュール単独の浮遊インダクタンスよりも小さくなります。

#### 3.1.1.7.1 放電 PCB

DC バス・コンデンサには大量のエネルギーが蓄積されるため、DC バスを適切な時間内に安全な電圧にするには放電抵抗が必要です。放電 PCB は、いずれかの DC バス・コンデンサの V+ 端子と V- 端子に取り付けられ、コントローラ上の DC バス電圧センス測定用のボード間コネクタに加えて、高電力の表面実装抵抗を備えています。これらの抵抗は、バスを 800V の公称電圧から 50V 未満に 1 分未満で放電するように設定されています。このため、抵抗ネットワークでは 9 つの抵抗で最大 9.4W を放電する必要があり、定格動作電圧は 1500V です。

## 3.2 テスト構成

### 3.2.1 ソフトウェア設定

インストールされていない場合は、プロジェクトのビルドと実行に必要な [Code Composer Studio \(CCS\)](#) をダウンロードしてインストールします。このプロジェクトには、[CCS バージョン 12.2.0](#) 以降をお勧めします。CCS のインストールと使用方法の詳細については、『[Code Composer Studio ユーザー・ガイド](#)』を参照してください。

TIDM-02014 用のソフトウェアは、[C2000Ware モーター制御 SDK](#) の一部として提供されています。C2000Ware モーター制御 SDK のインストールは、CCS のインストールとは別であることに注意してください。SDK をインストールした後、以下のガイドラインに従って CCS でプロジェクトをインポートおよび実行します。

#### 3.2.1.1 Code Composer Studio プロジェクト

TIDM-02014 用のソフトウェア・プロジェクトを CCS にインポートするには、**[Project]** → **[Import CCS Projects]** をクリックし、`<SDK install location>\designs\tidm_02014\<device>\ccs` を選択して **[Select Folder]** をクリックします。`tidm_02014_<device>` というプロジェクトを選択し、**[Finish]** をクリックします。これでプロジェクトが CCS の **[Project Explorer]** ペインに表示されます。[プロジェクトを CCS にインポートする方法の詳細については、ユーザー・ガイドを参照してください。](#)

`src_foc` フォルダには、パーク変換とクラーク変換、PID 機能、エスティメータなど、一般的な FOC モジュールが含まれています。これらのモジュールは、特定のデバイスやボードからは独立しており、SDK 内の他の複数の設計で使用されます。

`src_control` フォルダには、割り込みサービス・ルーチンおよびバックグラウンド・タスク内でモーター制御コア・アルゴリズム関数を呼び出すモーター・ドライブ制御ファイルが含まれています。`src_sys` フォルダには、CAN 通信用のドライバなど、他のシステム機能用に予約されたいくつかのファイルが含まれています。システム制御や通信など用に、独自のコードを使用できます。これらのモジュールは、このリファレンス・デザイン・プロジェクトに特定のものですが、デバイスやボードからは独立しています。

基板固有、モーター特定、およびデバイス特定のファイルは、`src_board` フォルダにあります。これらのファイルは、デザインを実行するデバイス特定のドライバで構成されています。プロジェクトを独自のボードや他のデバイスに移行する場合は、`hal.c`、`hal.syscfg` (または使用している場合は `hal_dclinkss.syscfg`)、`hal.h`、および `user_mtr1.h` ファイルをデバイスやボードのピン配置や機能に基づいて変更するだけです。

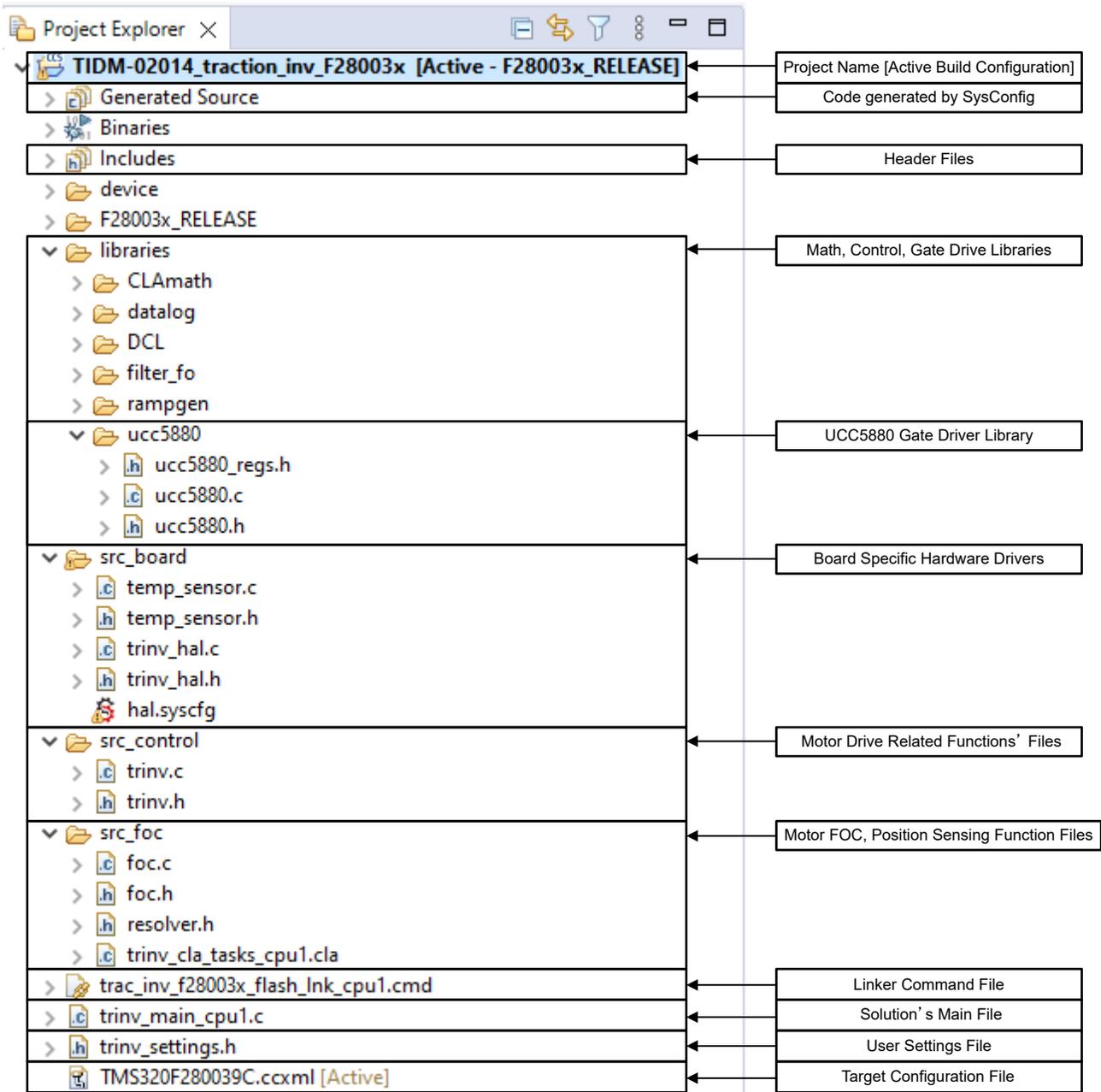
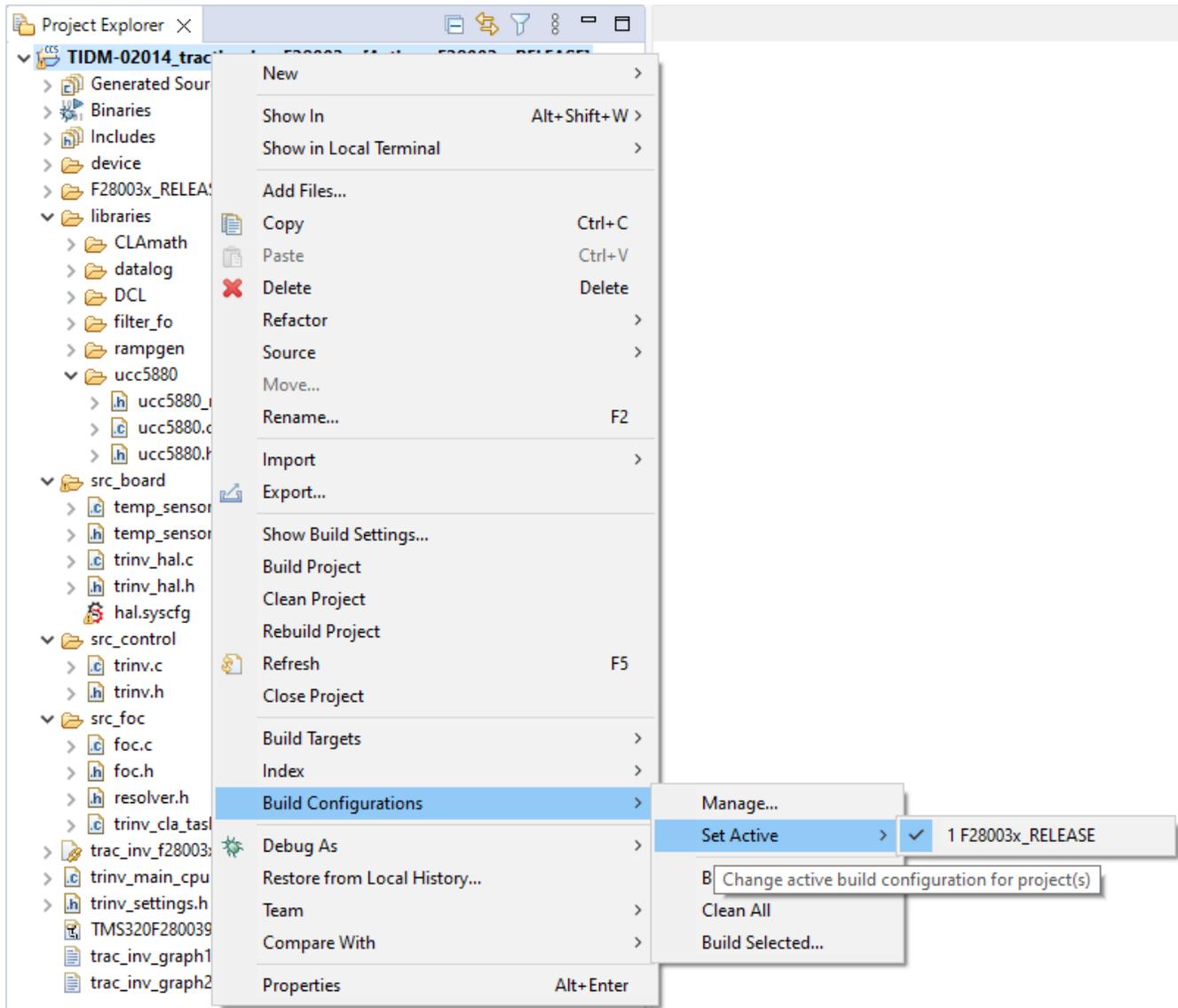


図 3-12. リファレンス・プロジェクトの [Project Explorer] ビュー

*tidm\_02014* プロジェクトのデフォルトのビルド構成は *F28003x\_RELEASE* という名前で、*hal.syscfg* ファイルを使用して ePWM、CMPSS、ADC パリフェラル、GPIO を構成します。この構成には、プロジェクトの事前定義済みシンボル、シングル・シャント電流再構築ライブラリ・ファイル、ビルドの一部としての関数呼び出しが含まれています。

デフォルトのビルド構成は、プロジェクトを右クリックし、**[Build Configurations]** → **[Manage]** を選択すると変更できます。さまざまなテスト・ケースに合わせてビルド構成を追加または変更できます。


**図 3-13. アクティブ・ビルド構成の選択**

プロジェクトのプロパティで事前定義されたシンボルを使用して、システムのさまざまな動作モードを有効または無効にできます。オプションは以下のとおりです。

- **CLOSED\_CURRENT\_LOOP**: d 軸と q 軸のモーター電流の閉ループ制御をイネーブルにします。
- **CLOSED\_SPEED\_LOOP**: 閉ループ速度制御をイネーブルにします。

これらのシンボルを事前定義されたシンボル・リストに追加すると、それぞれの機能がイネーブルになります。事前定義されたシンボルを表示および編集するには、プロジェクトを右クリックして **[Properties]** を選択します。図 3-14 に示すように、**[C2000 Compiler]** オプションの **[Predefined Symbols]** セクションを選択します。デフォルトでは、上記のシンボルは事前定義されたシンボル・リストに定義されており、対応する機能がイネーブルになっています。

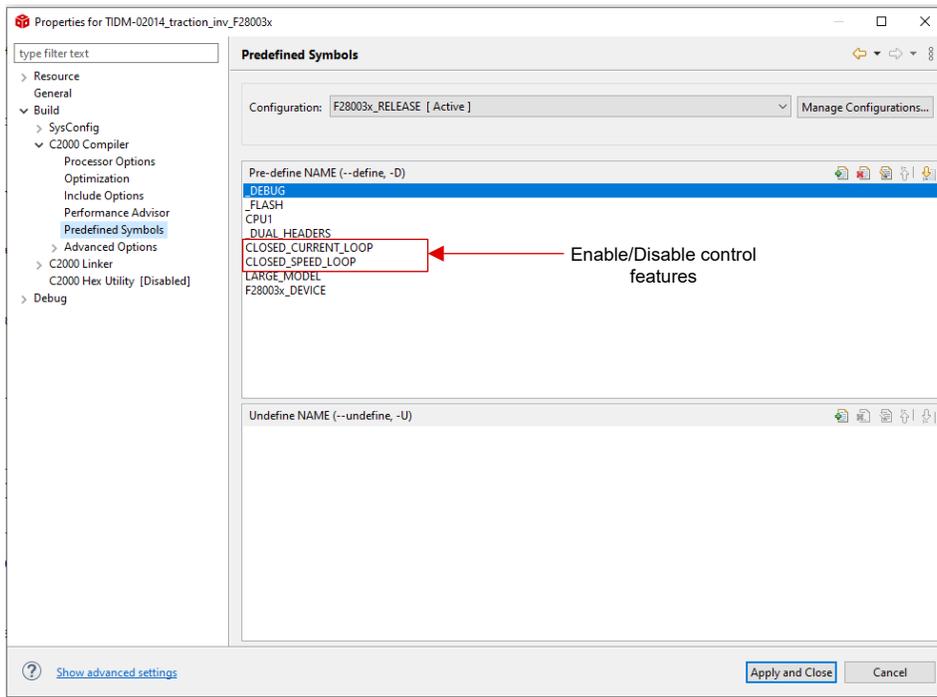


図 3-14. プロジェクトのプロパティで事前定義されたシンボルを選択

### 3.2.1.2 ソフトウェアの構造

プロジェクトの一般構造を図 3-15 に示します。デバイスのペリフェラル構成は C2000Ware Driverlib をベースにしており、SysConfig を使用して部分的に生成されるため、ハードウェアとデバイスの中でコードを移植できます。リファレンス・デザインのソフトウェアを別のボードまたはデバイスに移植する際に、変更する必要があるのは *trinv\_hal.c*、*trinv\_hal.syscfg*、および *trinv\_hal.h* ファイルと、*trinv\_settings.h* のパラメータのみです。

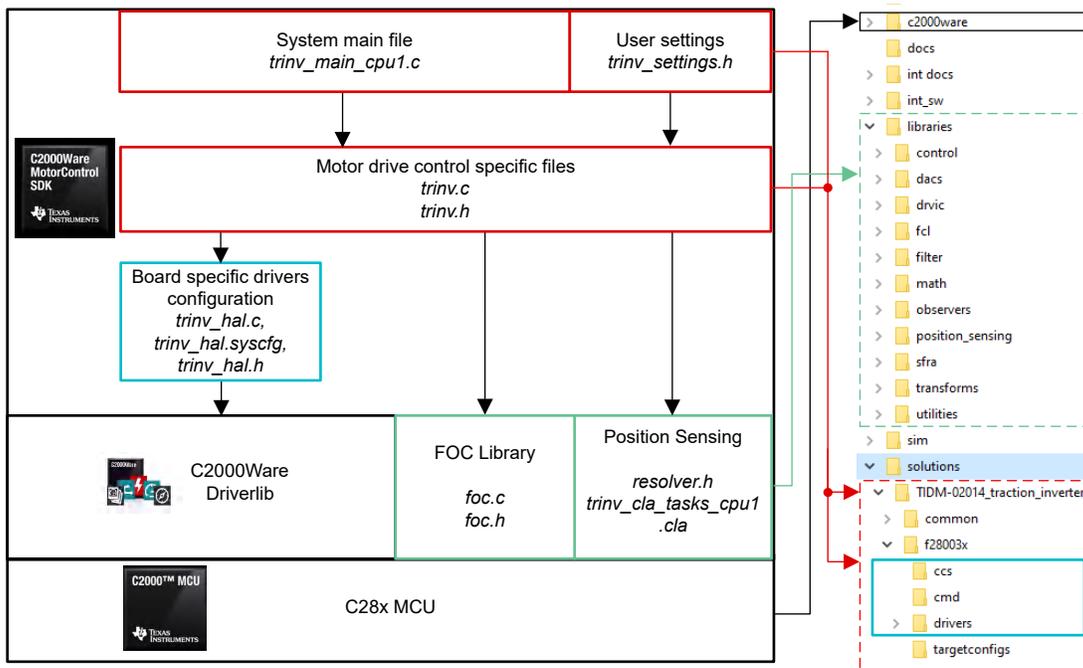


図 3-15. プロジェクト構造の概要

図 3-16 に、ファームウェアのプロジェクト・ソフトウェア・フロー図を示します。この図には、リアルタイム・モーター制御用の ISR が 1 つ、デバッグ・ウィンドウを使用してモーター制御パラメータを更新できるメイン・ループが含まれています。ISR

は、ADC の変換終了 (EOC) によってトリガされます。メイン ISR で実行される関数は、*trinv.h* ヘッド・ファイルで定義されます。さらに、この設計では、レゾルバ・インターフェイスを使用して、正確なモーター位置を検出します。レゾルバ信号の ADC 値を読み取り、対応する位置、速度計算を実行する関数は、独立した処理コアである制御補償器アクセラレータ (CLA) で実行されます。この関数は、*trinv\_cla\_tasks\_cpu1.cla* ファイルで定義されます。

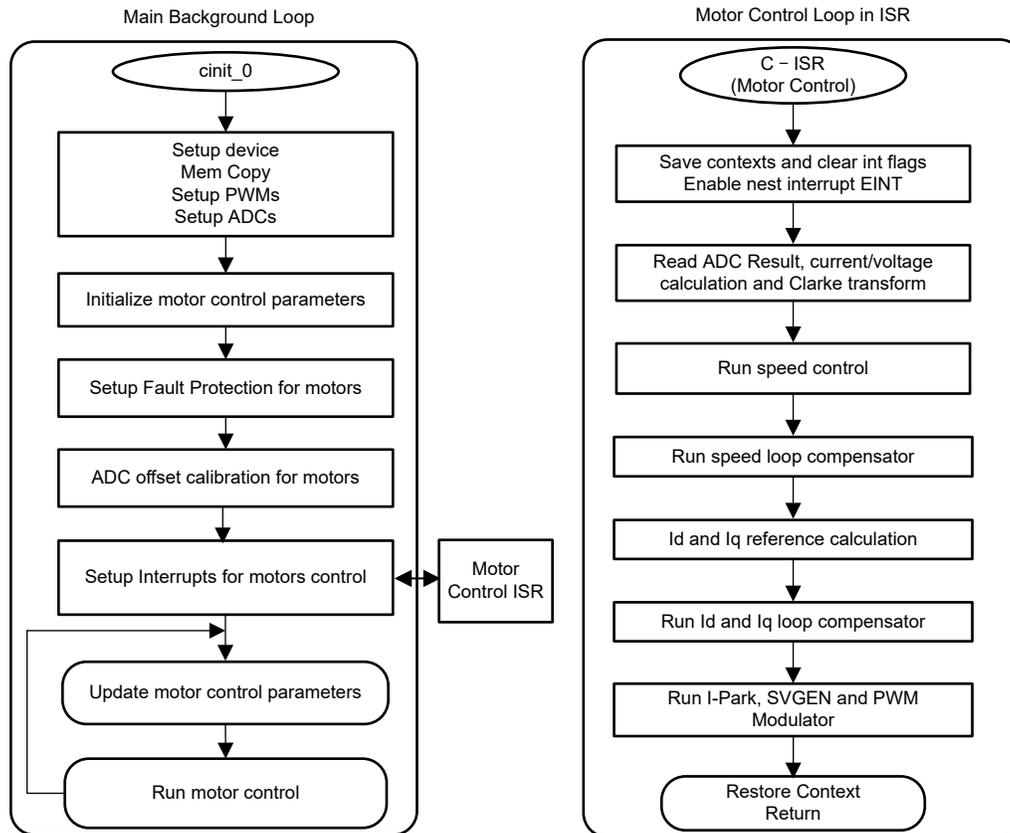


図 3-16. バックグラウンド・ソフトウェアとモーター制御 ISR のフローチャート

### 3.3 テスト方法

モーター制御ソフトウェアは、さまざまなテスト・モード用に構成することができ、ソフトウェアの段階的なテストを実施できます。たとえば、**CLOSED\_CURRENT\_LOOP** または **CLOSED\_SPEED\_LOOP** シンボルがどちらも定義されていない場合、 $V_d$  および  $V_q$  基準値は直接デフォルトのテスト値に設定されます。このモードは、PWM 設定と開ループ・インバータ動作のテストに使用できます。同様に、**CLOSED\_CURRENT\_LOOP** のみを定義し、**CLOSED\_SPEED\_LOOP** を定義しない場合は、 $i_d$ 、 $i_q$  基準を直接設定できます。この場合、ランプ・ジェネレータの周波数を設定することで、モーターの速度を設定できます。

ユーザー・モーター・タイプと対応するパラメータは、*trinv\_setting.h* ファイルに含まれます。デフォルト設定は、**USER\_MOTOR** マクロの値を変更することで変更できます。事前定義されたモーターのリストに含まれないモーターを使用する場合は、使用するテンプレートをコピーできます。

#### 3.3.1 プロジェクトの設定

プロジェクトを CCS にインポートし、適切なビルド構成を選択します。[Project Explorer] でプロジェクトを右クリックし、[Rebuild Project] を選択します。[Console] ペインでプロジェクトがエラーなしでビルドされていることを確認します。

ビルドが正常に完了したら、*tidm\_02014* プロジェクトを選択して、[Run] → [Debug] を選択するか、ツールバーの [Debug] ボタンをクリックします。デフォルトでは、プロジェクトの *TMS320F280039C.ccxml* ファイルを使用して、デバッグ・セッションが開始します。*TMS320F280039C.ccxml* は、TMDSCNCD280039C controlCARD にオンボードのテキサス・インスツルメンツ XDS110 USB デバッグ・プローブを使用するように構成されています。

[Debug] をクリックすると、CCS はターゲットに自動的に接続され、出力ファイルがデバイスにロードされて [CCS Debug] パースペクティブに変更されます。プログラムは main() の最初で停止するはずですが。

[Expressions] ペインが開いていない場合は、CCS メニュー・バーで [View] → [Expressions] をクリックします。変数を手動で追加するか、[Expressions] ウィンドウ内で右クリックして [Import...] を選択し、<SDK install location>\solutions\tidm\_02014\common\debug\tidm\_02014.txt を指定すると、このビルド・レベルに関連する変数の推奨リストをインポートできます。[OK] をクリックすると、ウィンドウに変数が表示されます。

[Expressions] ウィンドウのツールバーにある [Continuous Refresh] ボタンをクリックすると、CCS のデバッグ環境設定で定義されているレートでデータを継続的に更新できます。

### 3.3.2 アプリケーションの実行

[Run] → [Resume] を選択するか、ツールバーの [Resume] ボタンをクリックしてコードを実行します。これでプロジェクトが実行され、変数が [Expressions] ウィンドウに表示されます。アプリケーションとハードウェアのセットアップが動作していることを確認するには、以下をチェックします。

- ゲート・ドライブ・ボードの緑の電源 LED が点灯している必要があります。ゲート・ドライバが障害なしで初期化された場合、赤の nFault LED はいずれも点灯しません。ゲート・ドライブの初期化ステータスは、*tripFlagDMC.fault.UCC5880\_status* 変数を使用して確認できます。
- 同様に、*tripFlagDMC* 構造の他の変数が、他の障害のステータスを示しています。フォルト・フラグが設定されていない場合は、テスト・モーターを実行するために、*runMotor* を RUN\_MOTOR に設定できます。変数は、図 3-17 に示すように表示される必要があります。
- 障害が検出されない場合、*motor1.isrCount* が継続的にインクリメントしている必要があります。
- モーター・インバータ・ボードのキャリブレーション・オフセットを確認します。モーター相電流センシング値のオフセット値は、ADC のスケール電流の約半分である必要があります。
- モーター・ドライブの PWM 出力は、オシロスコープを使用してプローブすることもできます。

Expression	Type	Value	Address
(*) runMotor	enum <unnamed>	MOTOR_RUN	0x0000F887@Data
(*) speedRef	float	0.5	0x0000F844@Data
(*) tripFlagDMC.fault.UCC5880	enum <unnamed>	ALL_GOOD	0x0000B156@Data
(*) IqRef	float	0.100000001	0x0000F85C@Data
(*) motor1.dcBus_V	float	21.0616417	0x0000B058@Data
> tripFlagDMC	union <unnamed>	{all=0,fault={UCC5880_status=A...	0x0000B156@Data
> motor1	struct_Motor_t	{Ls_d=0.000198548049,Ls_q=0.00...	0x0000B040@Data
(*) IdRef	float	0.0	0x0000F85A@Data
(*) posFdbk	unsigned int	1	0x0000F840@Data
(*) motor1.omega_e	float	17.3629017	0x0000B066@Data
(*) motor1.theta_e	float	1.67985952	0x0000B064@Data

Callouts from the right side of the image:

- Enable continuous refresh (points to the toolbar button)
- Variable to enable motor run (points to runMotor)
- Speed reference input (points to speedRef)
- Iq reference for closed current loop testing (points to IqRef)
- Fault status monitoring (points to tripFlagDMC.fault.UCC5880)
- Struct with all motor related parameters (points to motor1)
- Motor's angular speed, position (points to motor1.omega\_e and motor1.theta\_e)

図 3-17. [Expressions] ビューを使用したランタイム制御とデバッグ

CPU を停止するには、ツールバーの [Suspend] ボタンをクリックするか、[Target] → [Suspend] を選択します。アプリケーションを最初から再度実行するには、[CPU Reset] ツールバー・ボタンをクリックするか [Run] → [Reset] → [CPU Reset] をクリックしてから、[Restart] ボタンまたは [Run] → [Restart] をクリックしてコントローラをリセットします。CCS デバッグ・セッションを閉じるには、[Terminate] ボタンをクリックするか、[Run] → [Terminate] をクリックします。これによりプログラムが停止し、CCS がコントローラから切断されます。

コードを変更するたびにデバッグ・セッションを終了する必要はありません。代わりに、[Run] → [Load] → [Load Program...] を選択します (同じファイルの場合は [Reload Program...] を選択)。実行可能ファイルが再ビルドされたことが検出されると、CCS からそのファイルを再ロードするかどうかを確認するメッセージが自動的に表示されます。

### 3.4 テスト結果

このセクションでは、システム・コンポーネントに対して実行されたテストの結果を示します。ゲート・ドライブとバイアス電源の結果を示した後、インバータ・システム全体を示します。

#### 3.4.1 絶縁バイアス電源

UCC14240-Q1 の起動動作は、[図 3-18](#) に示すように検証されます。

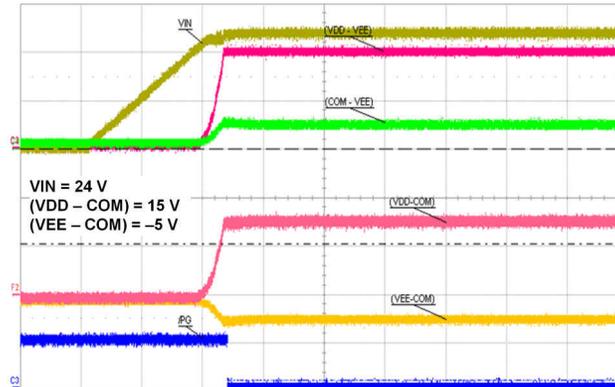


図 3-18. UCC14240-Q1 の電源投入シーケンス

UCC14240-Q1 の安定性を検証するため、負荷レギュレーション・テストを実施します。電子負荷は VEE と VCC の間に接続され、負荷ステップは 0~80mA です。[表 3-5](#) に、測定された出力電圧を示します。

表 3-5. UCC14240-Q1 の負荷レギュレーション

負荷 (mA)	V <sub>out</sub> (V)	電力 (W)
10	18.853	0.188
20	18.848	0.377
30	18.84	0.565
40	18.834	0.753
50	18.83	0.941
60	18.828	1.13
69	18.825	1.3
80	18.819	1.505

公称電圧値は 19V で、負荷レギュレーションは次の式で計算されます。

$$\text{Load regulation} = \left( \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\text{nom}}} \right) \times 100 = 0.18\% \quad (6)$$

#### 3.4.2 絶縁型ゲート・ドライバ

800V 未満のダブル・パルス・テストを実施して、さまざまな可変ゲート駆動強度のスイッチング動作を評価します。以下の結果は、弱い駆動 (5A) と強い駆動 (15A) の違いを示しています。ゲート・ソース間電圧、ドレイン・ソース間電圧、およびドレイン電流の波形を以下の図に示します。ターンオフ・エネルギーは最初のパルスの終わりに測定され、ターンオン・エネルギーは 2 番目のパルスの始めに測定されます。[図 3-19](#) に測定結果を示します。

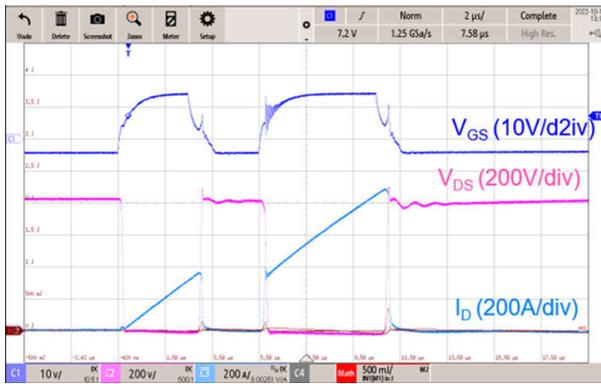


図 3-19. 駆動強度が弱いダブル・パルス・テスト

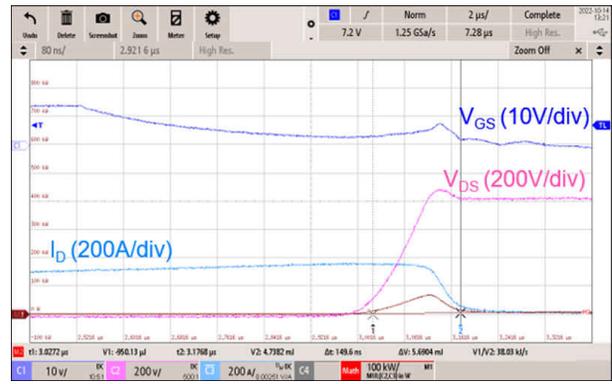


図 3-20. 弱い駆動強度のターンオフ波形

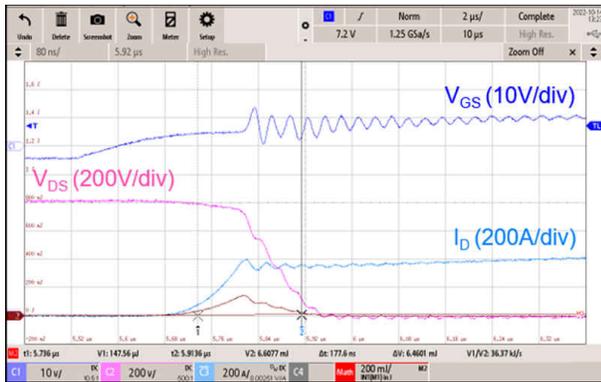


図 3-21. 弱い駆動強度のターンオン波形

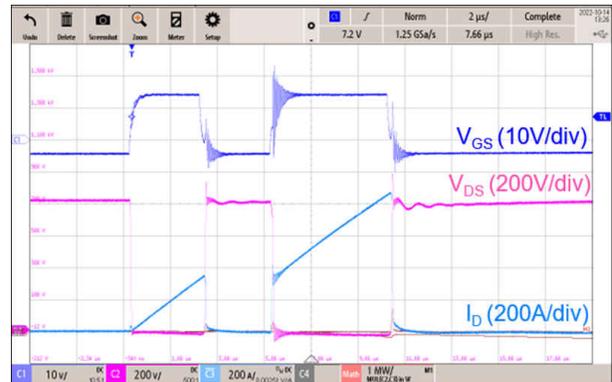


図 3-22. 強い駆動強度のダブル・パルス・テスト

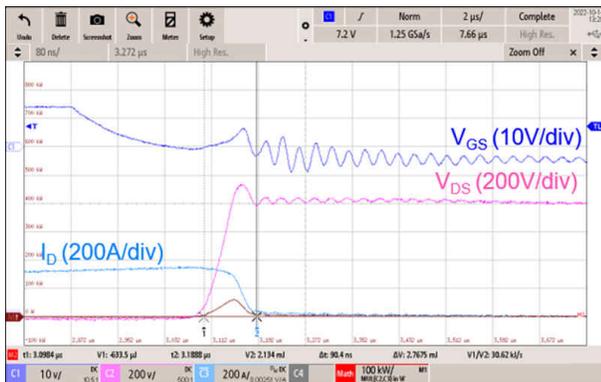


図 3-23. 強い駆動強度のターンオフ波形

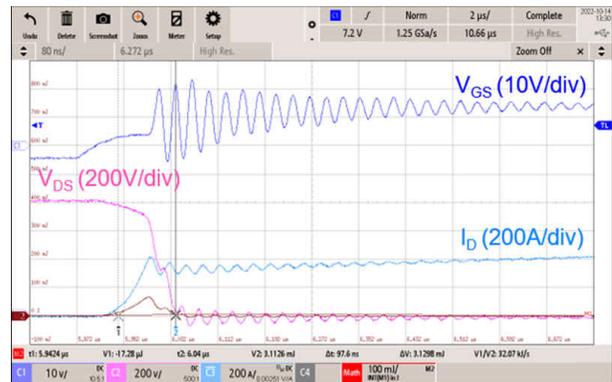


図 3-24. 強い駆動強度のターンオン波形

表 3-6. スイッチング・エネルギーの測定値

	弱い駆動 (5A)	強い駆動 (15A)
ターンオフ・エネルギー	5.65 mJ	2.77 mJ
ターンオン・エネルギー	6.46 mJ	3.13 mJ

### 3.4.3 インバータ・システム

トラクション・インバータ・システムは、誘導性負荷を使用して定格電圧および電力レベルでテストされています。UCC5880-Q1 ゲート・ドライバの駆動強度が変更され、システムの効率に及ぼす影響が調べられています。SiC MOSFET のドレイン・ソース間電圧 ( $V_{ds}$ ) と位相電流のスクープ・プロットを以下の図に示します。弱いゲート駆動強度と強い駆動強度のテスト波形をそれぞれ図 3-25 と図 3-27 に示します。表 3-7 に、テスト条件と結果の電力を示します。誘導性負荷テストでは、負荷電力は再循環されます。そのため、外部 DC 電源はシステム損失のみを供給し、 $P_{loss}$  として定量化されています。駆動強度が高いと、システム損失が低減することがわかります。これは主に、スイッチング損失の低減によるものです。ただし、図 3-27 に示すように、駆動強度が高いと、SiC MOSFET のドレイン・ソース間電圧オーバーシュートも大きくなります。UCC5880-Q1 ゲート・ドライバの可変駆動強度機能により、システム損失をリアルタイムで最適化できます。

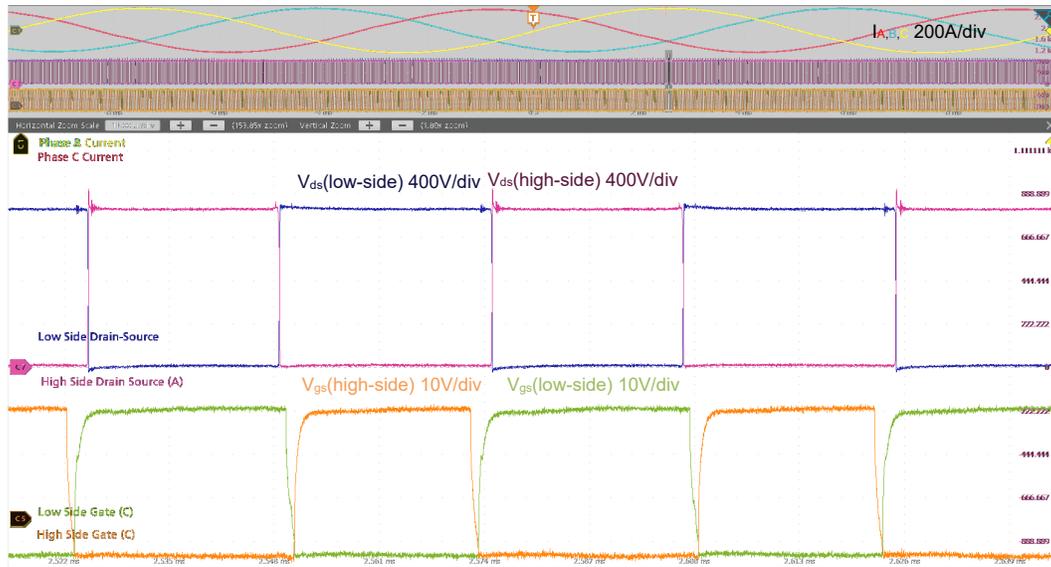


図 3-25. 弱いゲート駆動強度 ( $I_{RMS} = 285A$ ) での電圧と位相電流の波形

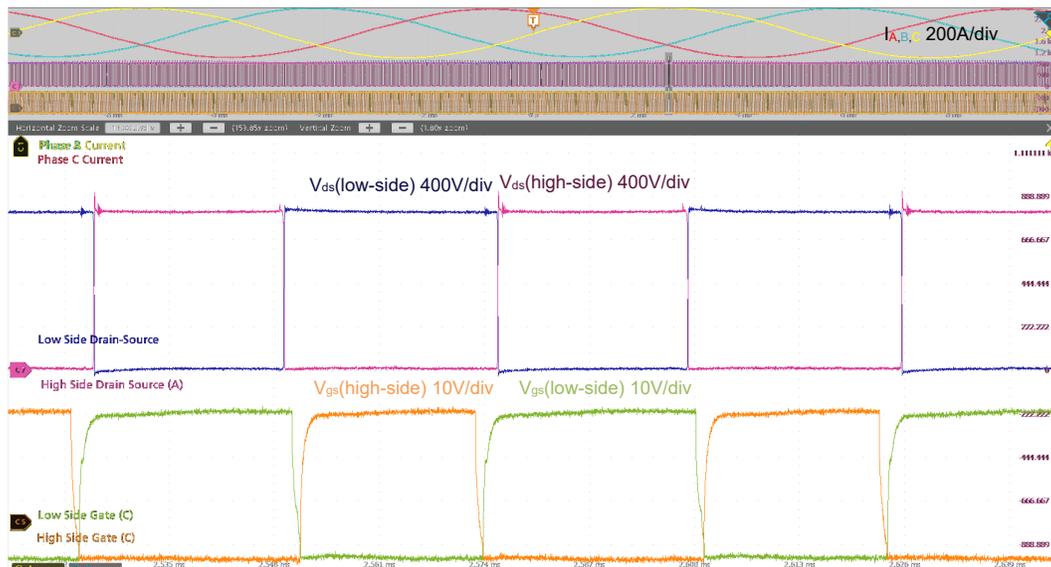


図 3-26. 弱いゲート駆動強度 ( $I_{RMS} = 320A$ ) での電圧と位相電流の波形

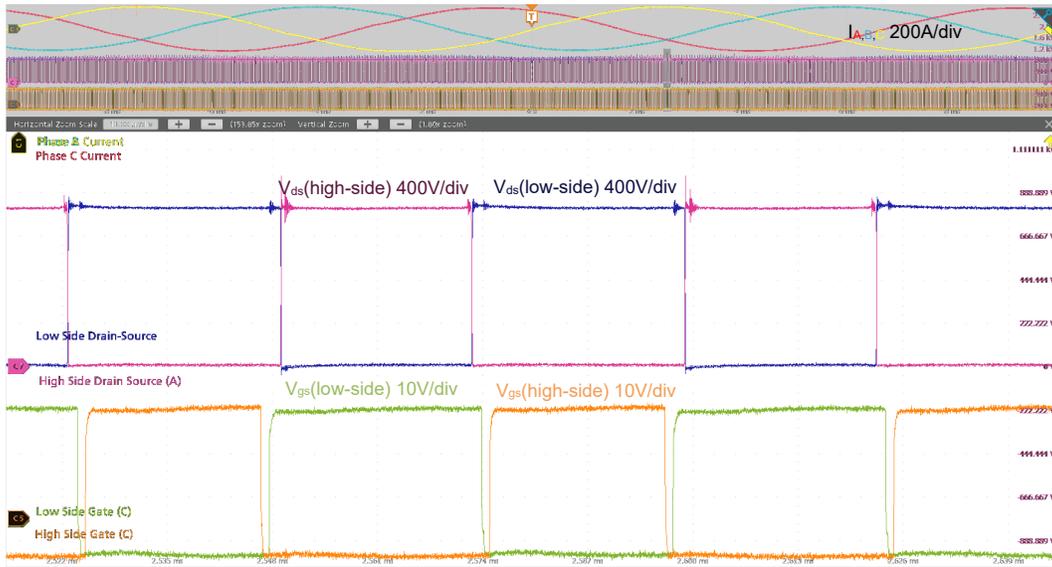


図 3-27. 強いゲート駆動強度 ( $I_{RMS} = 285A$ ) での電圧と位相電流の波形

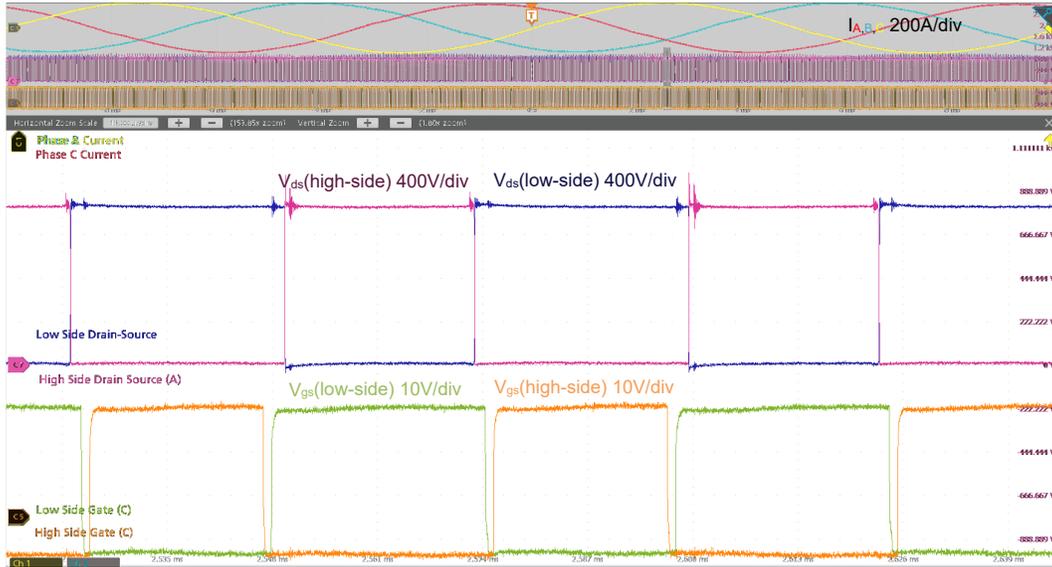


図 3-28. 強いゲート駆動強度 ( $I_{RMS} = 320A$ ) での電圧と位相電流の波形

表 3-7. テスト条件と結果

ゲート駆動強度	DC バス電圧	RMS 電流	$P_{loss}$
弱	800V	285A	4.2111kW
弱	800V	320A	5.1627kW
強	800V	285A	2.273kW
強	800V	320A	2.747kW

## 4 テキサス・インスツルメンツの高電圧評価基板 (TI HV EVM) におけるユーザーの安全のための一般的な指針



テキサス・インスツルメンツの設定および使用の手順に常に従い、すべてのインターフェイス・コンポーネントを推奨される電氣的定格電圧および電力制限範囲内で使用してください。電氣的な安全上の注意事項に常に従い、個人および周囲で作業中の人々の安全が確保されるようにします。詳細については、テキサス・インスツルメンツの[技術問い合わせ窓口](#)までご連絡ください。

今後の参考のため、すべての警告と手順を保存してください。

### 警告

警告および手順に従わないと、感電ややけどの危険により、人身傷害、物的損害、あるいは死亡をもたらす可能性があります。

TI HV EVM という用語は、電子デバイスが通常オープン・フレームの、密封されていないプリント基板アセンブリで提供されていることを意味します。開発ラボ環境で使用することを厳密に意図しており、高電圧電気回路の開発および応用における電氣的安全性の訓練を受け、技能と知識を有する有資格者のみが使用してください。その他の使用および/または応用は、テキサス・インスツルメンツにより厳密に禁止されています。適切な資格を有していない場合は、HV EVM のさらなる使用をただちに停止してください。

#### 1. 作業場の安全性

- a. 作業領域を清潔で整理整頓された状態に保ちます。
- b. 回路への電源投入は、必ず資格を有するオペレーターの立ち合いの下に行います。
- c. TI HV EVM およびそのインターフェイス電子機器に電源を投入する領域には、効果的なバリアと標識を必ず設け、不要なアクセスがないように、アクセス可能な高電圧が存在する可能性があることを明記します。
- d. 開発環境で使用されるすべてのインターフェイス回路、電源、評価基板、計器、メーター、スコープ、およびその他関連の装置で 50Vrms/75VDC を超えるものは、緊急電源遮断 EPO で保護された電源タップ内に電氣的に配置する必要があります。
- e. 安定した非導電性の作業台を使用します。
- f. 適切に絶縁されたクランプおよびワイヤを使用して測定用プローブおよび計器を接続します。可能な限りフリーハンド・テストは行わないでください。

#### 2. 電氣的安全性

予防措置として、EVM 全体が完全にアクセス可能で、アクティブ高電圧が印加されていると想定するのが良いエンジニアリング・プラクティスです。

- a. 電気測定またはその他の診断測定を行う前に、TI HV EVM およびその入力、出力、電気負荷の電源を切りまします。TI HV EVM の電源が安全に切断されていることを再確認します。
- b. EVM の電源が切断されていることを確認した上で、EVM 回路および測定装置が電氣的に導通していると想定して、必要な電気回路構成、配線、測定装置の接続、およびその他の応用ニーズを実施します。
- c. EVM の準備が整ったら、意図されたように EVM に電源を投入します。

### 警告

EVM に電源が投入されている間、EVM またはその電気回路に触らないでください。高電圧により感電の危険性があります。

#### 3. 個人の安全

- a. 個人用保護具 (ゴム手袋やサイドシールド付き保護メガネなど) を身につけ、EVM を適切なインターロック付きの透明のプラスチック箱に入れて保護するなどして、不用意に触ることがないようにします。

#### 安全使用の制限:

EVM は、量産ユニットのすべてまたは一部として使用することを意図していません。

## 5 設計とドキュメントのサポート

### 5.1 設計ファイル

#### 5.1.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDM-2014](#) のデザイン・ファイルを参照してください。

#### 5.1.2 BOM

部品表 (BOM) をダウンロードするには、[TIDM-2014](#) のデザイン・ファイルを参照してください。

#### 5.1.3 PCB レイアウトに関する推奨事項

##### 5.1.3.1 レイアウトのプリント

各ボードのレイアウト・プリントをダウンロードするには、[TIDM-2014](#) のデザイン・ファイルを参照してください。

#### 5.1.4 Altium プロジェクト

各ボードの Altium プロジェクト・ファイルをダウンロードするには、[TIDM-2014](#) のデザイン・ファイルを参照してください。

#### 5.1.5 ガーバー・ファイル

各ボードのガーバー・ファイルをダウンロードするには、[TIDM-2014](#) のデザイン・ファイルを参照してください。

#### 5.1.6 アセンブリの図面

各ボードのアセンブリの図面をダウンロードするには、[TIDM-2014](#) のデザイン・ファイルを参照してください。

## 5.2 ツールとソフトウェア

### ツール

[TMDSCNCD280039C](#) TMS320F280039C 評価基板 controlCARD は、F28003x デバイス・シリーズ向けの低コスト評価 / 開発ボードです。TMS320F280039C は、標準の 180 ピン controlCARD HSEC インターフェイスを介してリファレンス・ボードに接続された、この設計用のドーター・カードとして使用されます。

[TMDSCNCD263](#) TMDSCNCD263 は、HSEC180 controlCARD をベースとする、Sitara™ 高性能マイコンである AM263x シリーズ向けの評価 / 開発ツールです。このボードは、初期の評価とプロトタイプ製作用に設計されています。次期アプリケーションの開発に適した、標準化済みで使いやすいプラットフォームを実現します。

### ソフトウェア

#### [C2000WARE-MOTORCONTROL-SDK](#)

モーター制御 SDK は、C2000 リアルタイム・コントローラ・ベースのモーター制御システムの開発用に設計された一連のソフトウェア、ツール、および資料です。

#### [MCU-PLUS-SDK-AM263X](#)

AM263x MCU+ SDK (マイコン + ソフトウェア開発キット) はテキサス・インスツルメンツの組み込みプロセッサ向けの統合ソフトウェア・プラットフォームであり、セットアップが容易で、サンプルとベンチマークとデモをすぐに利用できます。

### 5.3 ドキュメントのサポート

1. Mouser、[『ハイブリッド / 電気自動車向け Easy 1B/2B 車載用パワー・モジュール』](#)、製品概要
2. テキサス・インスツルメンツ、[単一 IGBT ドライバのバイアス向けにデュアル絶縁出力を供給する Fly-Buck パワー・モジュールのリファレンス・デザイン](#)、デザイン・フォルダ
3. WürthElectronics、[仕様シート: 750315445](#)
4. テキサス・インスツルメンツ、[『TPS54160-Q1 を使用した CISPR25 放射エミッションへの合格』](#)、アプリケーション・ノート
5. テキサス・インスツルメンツ、[『TPS54xx0-Q1 および TPS57xx0-Q1 設計計算ツール』](#)

## 6. WurthElectronics、仕様シート: 760390014

### 5.4 サポート・リソース

TI E2E™ サポート・フォーラムは、エンジニアが検証済みの回答と設計に関するヒントをエキスパートから迅速かつ直接得ることができる場所です。既存の回答を検索したり、独自の質問をしたりすることで、設計に必要な支援を迅速に得ることができます。

リンクされているコンテンツは、該当する貢献者により、現状のまま提供されるものです。これらは TI の仕様を構成するものではなく、必ずしも TI の見解を反映したものではありません。TI の [使用条件](#) を参照してください。

### 5.5 商標

TI E2E™, Sitara™, and C2000™ are trademarks of Texas Instruments.

EconoDUAL™ is a trademark of Infineon Technologies Ag.

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

EtherCAT® is a registered trademark of Beckhoff Automation GmbH.

Simple Switcher® is a registered trademark of Texas Instruments.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 6 用語

**AFE** - アナログ・フロント・エンド

**NTC** - 負温度係数サーミスタ

**LDO** - 低ドロップアウト・レギュレータ

**UVLO** - 低電圧誤動作防止

**TVS** - 過渡電圧抑制

**CMTI** - 同相過渡電圧耐性

**DESAT** - 脱飽和

**IGBT** - 絶縁型ゲート・バイポーラ・トランジスタ

**MOSFET** - 金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ

**PWM** - パルス幅変調

**SiC** - シリコン・カーバイド

**MCU** - マイクロコントローラ・ユニット

**BJT** - バイポーラ・ジャンクション・トランジスタ

**PCB** - プリント基板

**RPM** - 回転/分

## 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 © 2023, Texas Instruments Incorporated