参考資料

Design Guide: TIDM-02014

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

説明

このリファレンス デザインは、テキサス・インスツルメンツと Wolfspeed® が開発した、800V、300kW の SiC (シリコン カーバイド) ベースのトラクション インバータです。このデザインは、開発期間の短縮を支援する高性能で高効率のトラクション インバータを製作するための基礎を提供します。

リソース

TIDM-02014	デザイン フォルダ
UCC5880-Q1、UCC5881-Q1	プロダクト フォルダ
F29H859TUQ1、TPS653860-Q1	プロダクト フォルダ
UCC14240-Q1、UCC14241-Q1、UCC33421-Q1	プロダクト フォルダ
AMC0386-Q1、AMC0381D-Q1	プロダクト フォルダ
TCAN1043-Q1、ISO1042-Q1、ALM2403-Q1	プロダクト フォルダ

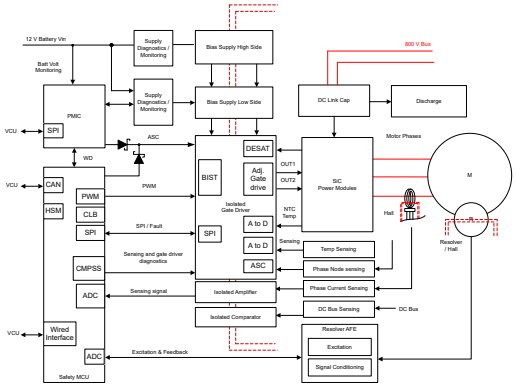
テキサス・インスツルメンツの E2E™ サポート エキスパートにお問い合わせください。

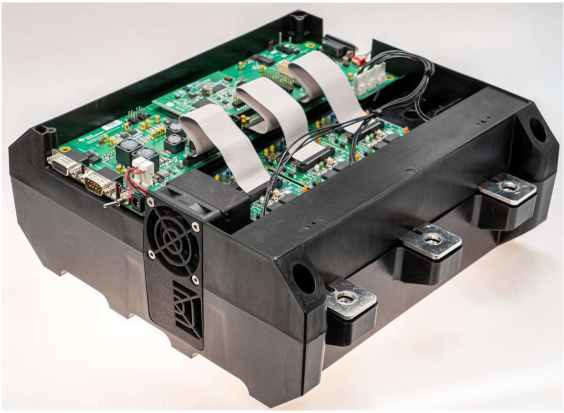
特長

- リアルタイムで可変のゲート駆動能力機能により、SiC スイッチングの電力損失を最小化してシステムの効率を向上させ、高精度のバイアス電源を使用して導通損失を最小限に抑えることが可能。
- 絶縁型ゲートドライバ、バイアス電源モジュール、および高集積電圧センシング デバイスにより、高電圧源に直接接続できるため、PCB 面積を大幅に削減できます
- 3 個の C29 リアルタイム デジタル信号プロセッサ (DSP) コアを搭載した高性能マイコン (MCU) を使用すると、2µs 未満のモーター制御ループを実現でき、トルクリップルを最小化し、トラクション モーターに滑らかな速度とトルク電流プロファイルを提供することができます
- 3×120 の高速、高密度コネクタを搭載したシステム オン モジュール設計により、MCU 評価のための高いピン要件に対応できます
- UCC5880-Q1 および F29H859TU-Q1 は、機能安全準拠デバイスです。
- 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させます。

アプリケーション

- HEV と EV のインバータおよびモーター制御





English Document: TIDUF23

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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りした場合に感電、火災、負傷の原因となる電圧および電流で動作します。負傷や物品の破損を避けるために、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 用語

AFE	アナログ フロント エンド
NTC	負の温度係数 (NTC) 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)	脱飽和
IGBT	絶縁型ゲート バイポーラ トランジスタ
MOSFET	金属酸化物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	回転数 / 分

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

1.2 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	ドレインとソース間の最大電圧
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}	300µF	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 × 29cm × 11.5cm	
重量	6.2kg	
ボリューム	9.3L	
面積	812cm^2	
P	5bar	冷却剤の動作圧力
ΔP	200mbar	圧力損失

警告
外部接続:ハードウェアへのすべての外部接続は、システムに接続されているすべてのハードウェアおよびコンポーネントの推奨動作条件および使用目的の範囲内に維持する必要があります。

- 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、F29H859TU-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、EAB450M12XM3 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 リンク電流をディレーティングする必要があります。詳細については、FTCAP GmbH (Mersen) 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 Wiand MicroCool CP3012-XP です。熱抵抗 (℃/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。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

2 システム概要

2.1 ブロック図

図 2-1 に主要な TI 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。

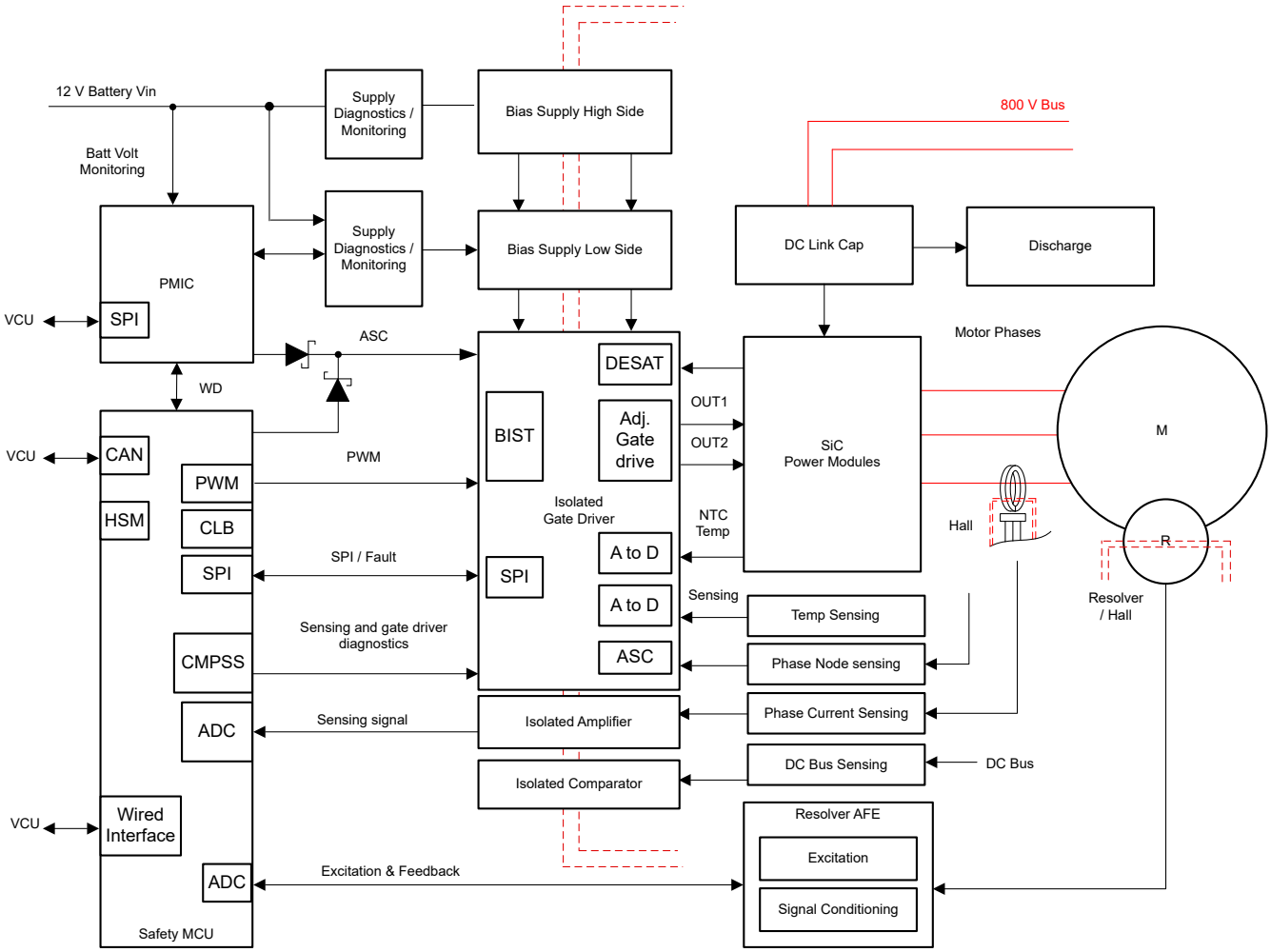


図 2-1. TIDM-02014 SiC インバータ システムのブロック図

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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 リファレンス デザインは C2000™ リアルタイム制御 MCU を採用し、モーターを駆動しながら高いリアルタイム性能を実現しながら、機能安全要件をサポートするためのフィールド オリエンテッド制御 (FOC) 方式を実装しています。

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使用されます。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、以下の 5 つの重要なパラメータを考慮します。

1. 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。
2. 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。
3. 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が利用されます。
4. 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、フォルト状況で最大の耐久性を実現します。
5. 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 × 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 および 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、スレッショルド、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 および 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 F29H859TU-Q1

F29H859TU-Q1 は、パワー エレクトロニクスの効率を高めるために設計されたスケーラブルな超低レイテンシ デバイスである C2000 リアルタイム マイクロコントローラ ファミリの製品です。C29x CPU は、オンチップ フラッシュまたは RAM から実行される、32 ビットおよび 64 ビットの浮動小数点および固定小数点の信号処理をサポートしています。C29x CPU は、三角関数演算命令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重要なアルゴリズムを高速化します。システム レベルの ASIL-D 機能安全設計をサポートするための多くの機能を備えています。

2.3.3 UCC14240-Q1

UCC142140-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_{RMS} の基本絶縁膜全体で 1.5W を上回る電源

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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 も用意しています。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。BOM を最適化するため、UCC14341-Q1 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 レールに直接接続できます。

2.3.4 UCC33421-Q1

UCC33421-Q1 は、5kV$_{RMS}$ 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、1.5W (標準値) の絶縁電力を高効率かつ低 EMI で供給できます。UCC33421-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、広い入力 (3.0V ～ 5.5V) 選択機能、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。

2.3.5 AMC0386-Q1

AMC0386-Q1 は、高電圧、高インピーダンス入力、外部クロックを備えた高精度、ガルバニック絶縁型デルタシグマ (ΔΣ) 変調器です。入力は、高電圧信号源に直接接続できる設計を採用しています。

この絶縁バリアは、異なる同相電圧レベルで動作するシステム領域を分離します。絶縁バリアは、磁気干渉に対して高い耐性があり、最大 5kV$_{RMS}$ (60s) の強化絶縁を実現することが認証されています。

AMC0386-Q1 は、±600V、±1000V のリニア入力範囲で供給されます。AMC0386-Q1 の入力に抵抗分圧器は、HVIN ピンに印加される電圧を ±1V レベルに分圧します。この信号は SNSP ピンで利用できます。これは、アナログシグナルチェーンの入力でもあります。

AMC0386-Q1 の入力段は、2 次のスイッチング コンデンサ、フィードフォワード ΔΣ 変調器に電力を供給します。変調器は、アナログ信号をビットストリームに変換します。ビットストリームは、絶縁バリアをまたぐ転送されます。出力ビットストリームは、外部クロックと同期します。このデバイスは、sinc3 や OSR 256 フィルタと組み合わせることにより、16 ビットの分解能、84dB のダイナミック レンジ、39kSPS のデータ レートを実現します。

AMC0386-Q1 は、その内蔵抵抗分圧器、低温度ドリフト、高寿命の安定性により、システムレベルのキャリブレーションなしに、寿命および温度ドリフトを含めて 1% を超える電圧検知精度を実現します。

2.3.6 AMC0381D-Q1

AMC0381D-Q1 は、高電圧 DC、高インピーダンス入力、固定ゲイン差動出力を備えた高精度、電気的絶縁型アンプです。入力は、高電圧信号源に直接接続できる設計を採用しています。

この絶縁バリアは、異なる同相電圧レベルで動作するシステム領域を分離します。絶縁バリアは、磁気干渉に対して高い耐性があり、最大 5kV$_{RMS}$ (60s) の強化絶縁を実現することが認証されています。

AMC0381D-Q1 は、入力電圧に比例する差動信号を出力します。差動出力はグランド シフトの影響を受けず、長距離にわたる出力信号の配線が可能です。

AMC0381D-Q1 は、600V と 1000V のリニア入力範囲で利用可能です。AMC0381D-Q1 の入力に抵抗分圧器は、HVIN ピンに印加される電圧を 1V レベルに分圧します。この信号は SNSP ピンで利用できます。これは、アナログシグナルチェーンの入力でもあります。

AMC0381D-Q1 は、その内蔵抵抗分圧器、低温度ドリフト、高寿命の安定性により、システムレベルのキャリブレーションなしに、寿命および温度ドリフトを含めて 1% を超える電圧検知精度を実現します。

2.3.7 TCAN1043-Q1

TCAN1043-Q1 は、ISO 11898-2:2016 高速 CAN 仕様と CiA 601-4 信号改善機能 (CAN) 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シブのエッジで信号リンギングを低減し、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複数の未終端のスタブを持つ大規模ネットワークで 2Mbps で動作または 5Mbps 以降で動作することで、CAN (フレキシブル データ レート) FD 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 ウィンドウで正しいビットをサンプリングす

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

ることができ、リンギ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 デバイスは、ISO11898-2 (2016) 規格に準拠したガルバニック絶縁 CAN (コントローラ エリア ネットワーク) トランシーバです。ISO1042-Q1 デバイスは、±70VDC バス フォルト保護を搭載し、±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しており、Classic CAN よりはるかに高速にペイロードを伝送できます。耐圧 5000V_{RMS} の二酸化ケイ素 (SiO_2) 絶縁膜を採用しており、1060V_{RMS} の動作電圧を実現しています。電磁環境適合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すると、高電圧に対して保護するとともに、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。このデバイスは、最低 3.2V で起動できます。BIAS (バイアス) ピンが 3.2V を上回っている場合、最低 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 の電力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実現します。このデバイスには、逆バッテリ入力、逆電流、過電圧、低電圧、過電流、短絡保護機能が内蔵されています。高精度の過電流制限 (1A で ±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ョルドを 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。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

2.4 システム設計理論

2.4.1 マイコン

マイクロコントローラは、1 次制御ユニットとして、このリファレンス デザインの中央に配置されています。TIDM-02014 デザインは、テキサス・インスツルメンツの C2000™ ファミリ の F29H859TU-Q1 デバイスをサポートしているほか、SOM - TIDM-02014 制御ボードに直接プラグインする F29H85X-TIDM-EVM をサポートしています。

2.4.1.1 マイクロコントローラ – C2000™

F29H85X-SOM-EVM は、C2000™ マイコン シリーズの F29H85x と F29P58x の各デバイスに適した評価 / 開発ボードです。このシステム オン モジュール (SOM) デザインは、初期評価とプロトタイプ製作に最適な選択肢になります。この評価基板 (EVM) の SOM アーキテクチャには、F29H85x デバイスを動作させるために必要なすべての電源、リセット、クロック ロジックが搭載されています。この 360 ピン SOM は、ほとんどの環境で動作できる、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。*F29H85X controlSOM 評価ボード* の EVM ユーザーガイドも参照してください。F29H85X-SOM-EVM を評価するには、デバッグ プローブである XDS110ISO-EVM が必須であり、この製品は別売りの形で購入できます。TIDM-02014 リファレンス デザインを使用するには、これらの EVM 両方が必要です。

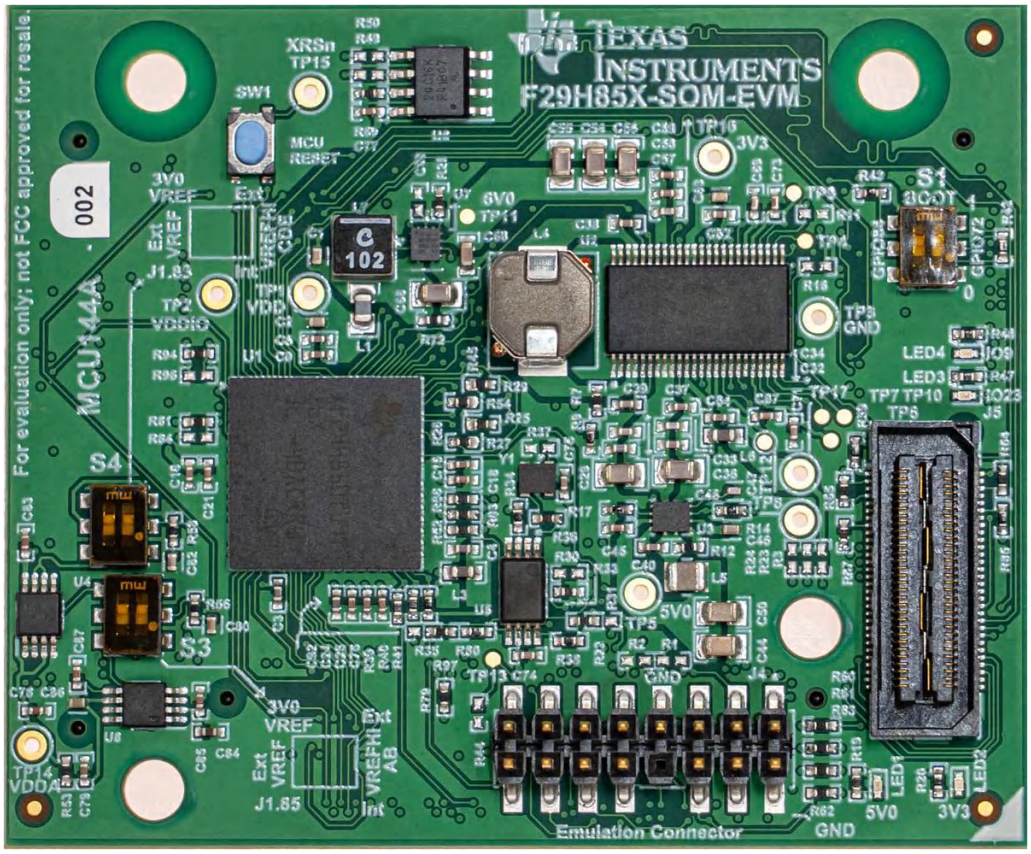


図 2-2. F29H85X-EVM SOM 前面

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

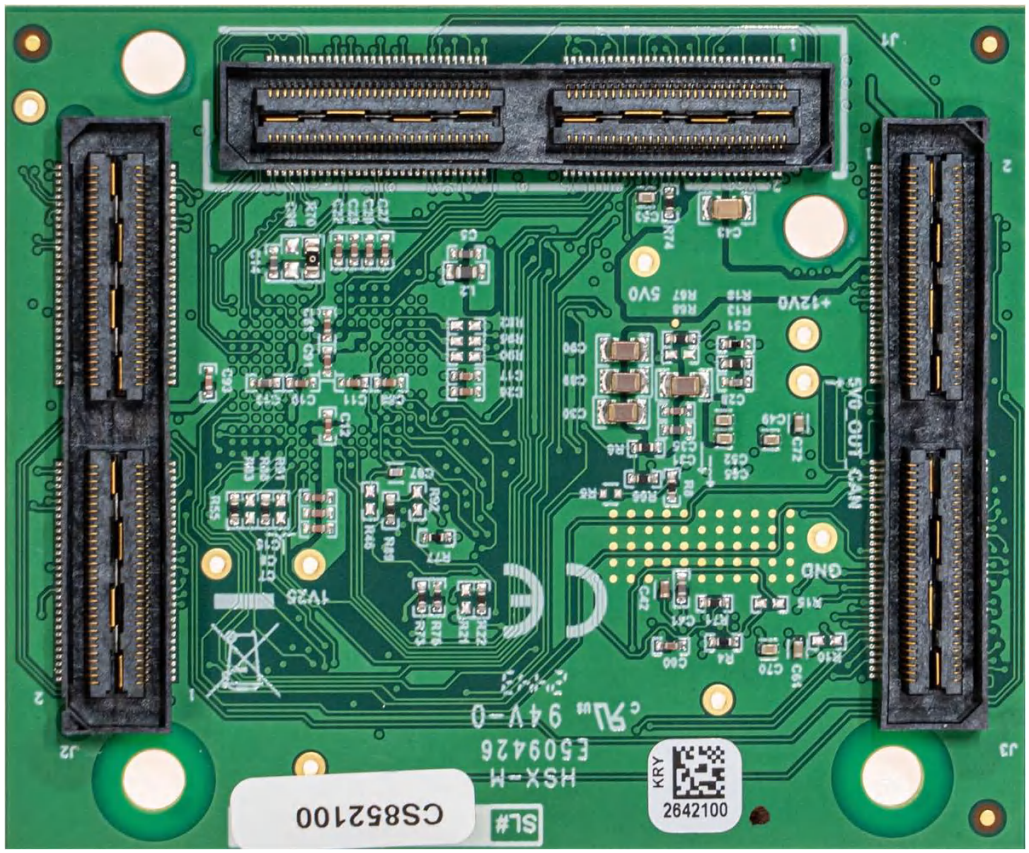


図 2-3. F29H85X-EVM SOM バック

2.4.2 絶縁型バイアス電源

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) 入力で動作し、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、±1.3% 以内に厳密に調整されており、Wolfspeed 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 LVTTL 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 スレッショルドを上回り、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。

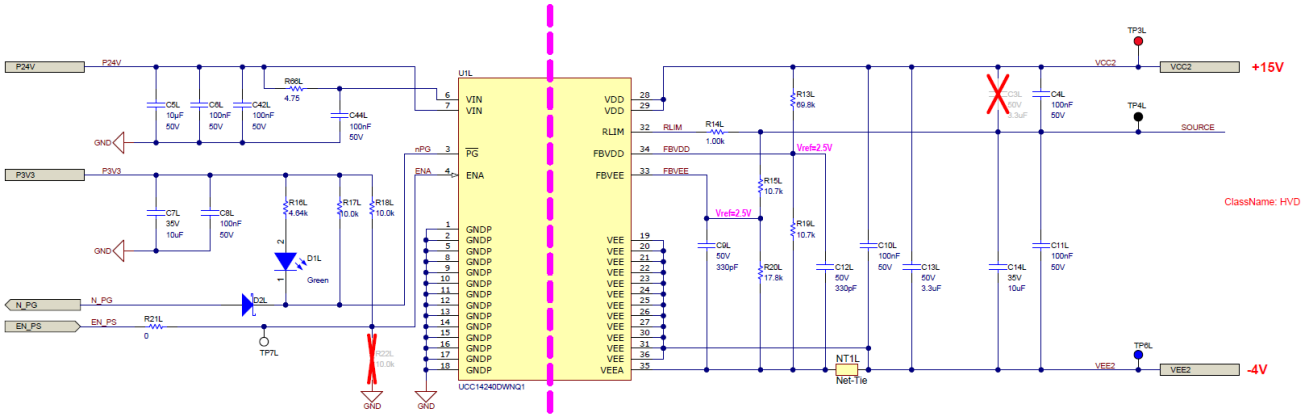


図 2-4. UCC14240-Q1 バイアス電源の回路図

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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 SOM 評価ボード
- 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 (8VDC ～ 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 (PJ-037AH データ シートを参照)。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

2.4.3.2 電源ツリーのブロック図

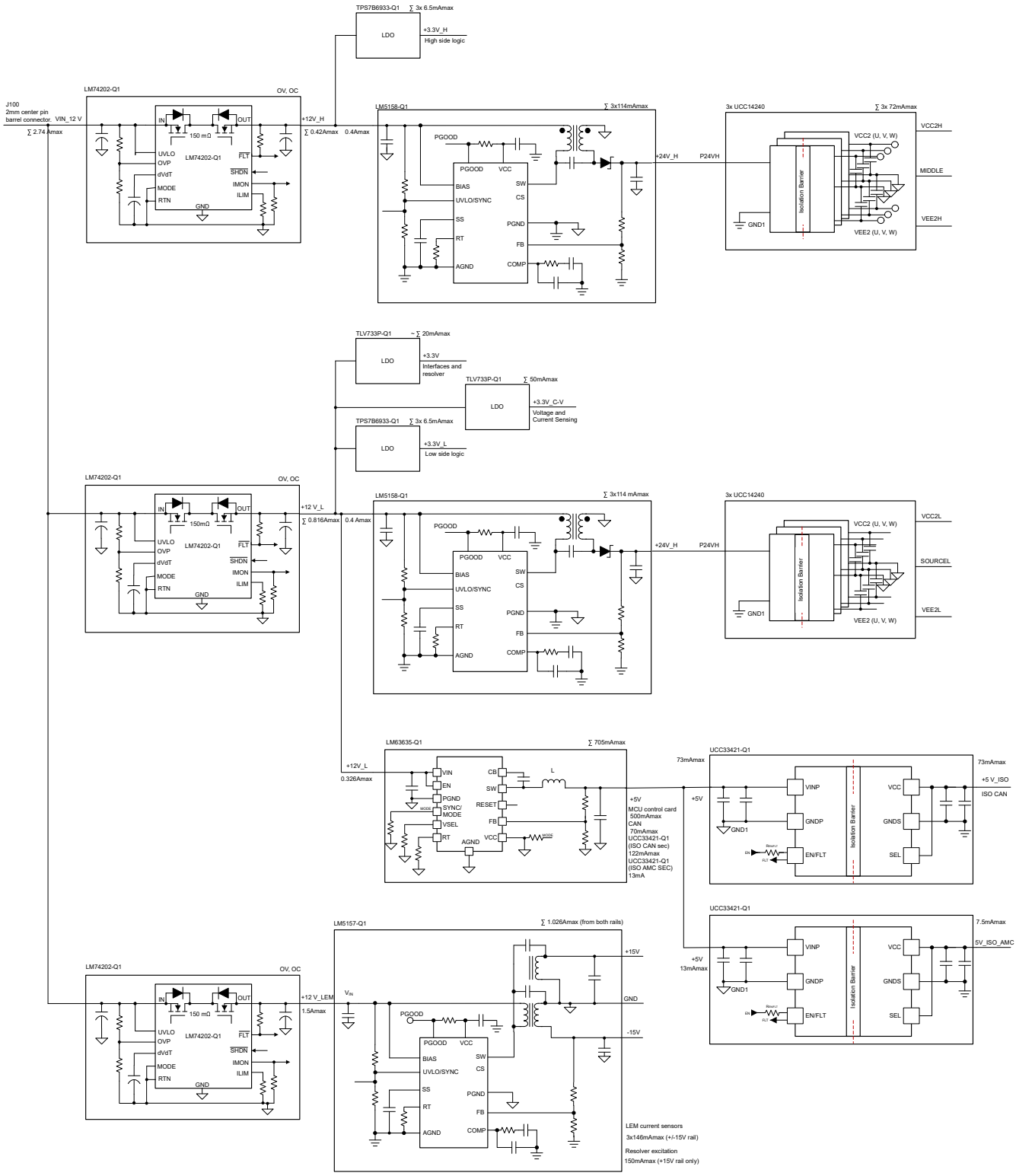


図 2-5. 電源ツリーのブロック図

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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	規制	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 コンディショニング	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
	LMR63635-Q1 降圧	5V 電源ドメイン	0.81A
	UCC33421-Q1 絶縁型 DC-DC	絶縁型 CAN	0.123A
	UCC33421-Q1 絶縁型 DC-DC	絶縁型電圧センシング	0.013A
+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バ 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。コンパクトで使いやすいモジュールが選択されています。

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。

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

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。結果として、2 次側の消費電力は 1.368W と計算されます。効率が 50% であると仮定すると、これは各 UCC14240-Q1 の 24V 入力側の電源電流の 114mA 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、結合インダクタを使用した 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に対応しています。この場合は、デバイスの汎用性とランダム スペクトラム拡散のおかげで、ノイズ特性を考慮して LM5157 および LM5158-Q1 コンバータを使用します。

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。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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	公称値	最大値	単位
V_{INPUT}	8	12	16	V
f_{SW}		435		kHz
V_{LOAD}		24		V
I_{LOAD}		0.35		A

各 24V SEPIC は、3 個の UCC14240-Q1 デバイスに電源を供給するため、I_{LOAD} = 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、LM63635-Q1 降圧型電圧コンバータが搭載されています。この電源は主に MCU SOM 評価ボード、非絶縁 CAN に電力を供給し、絶縁 CAN および絶縁電圧センシングに電力を供給する絶縁 DC-DC コンバータに電力を供給します。

LM63625-Q1 の最大出力電流は 3.25A です。705mA の負荷と 90% の効率を考慮すると、このデバイスは 12V 電源レールから約 326mA を引き込みます。図 2-5 すべての分岐における負荷電流の現実的な推定値を示します。

MCU SOM 評価ボードは、他の部品より多くの電力使用を想定しています。したがって、電力バジェットの計算は、推定消費電力に基づいています。

未使用のペリフェラルがすべてディセーブルの場合、この評価ボ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、UCC33421-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 5kV_{RMS} の絶縁時に最大 1.5kW の電力を供給します。ISOCAN1042-Q1 デバイスを使用する絶縁側の負荷が 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。

AMC0386-Q1 の 2 次側には、別の UCC33421-Q1 デバイスを使用して電力を供給します。60% の効率での 7.5mA の消費電力は、DC/DC コンバータの 1 次側で 0.013A を想定しています。

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_LEM 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)。

$$I_{CCLEM}(mA) = 44mA + 0.2\ I_{MEAS}(A) \tag{2}$$

ここで、

- 44mA はトランスデューサの静止電流です
- I_{MEAS} は測定された電流です

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 V_{IN} 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 および LM5158 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_{LOAD} を決定する必要があります。V_{LOAD} = 15V と仮定した場合、

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

電流トランスデューサの消費電力を 2 倍にします。これは 2 つの駆動分岐を表します (±15V を生成)。I_{LOAD} は次のように計算できます。

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

ここで、

- 係数 3 は、電源に接続されている 3 つのチャネルを表します
- 150mA は、リゾルバ励起の電力バジェットを表します

表 2-3 のパラメータは、計算スプレッドシートの部品計算に使用されます。

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	公称値	最大値	単位
V_{INPUT}	8	12	16	V
f_{SW}		435		kHz
V_{LOAD}		15		V
I_{LOAD}		0.35		A

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

3 ハードウェア、テスト要件、およびテスト結果

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、アセンブルされたインバータ システムの機能セクションを示します。各セクションの追加のハードウェアについて、この後詳細に説明します。

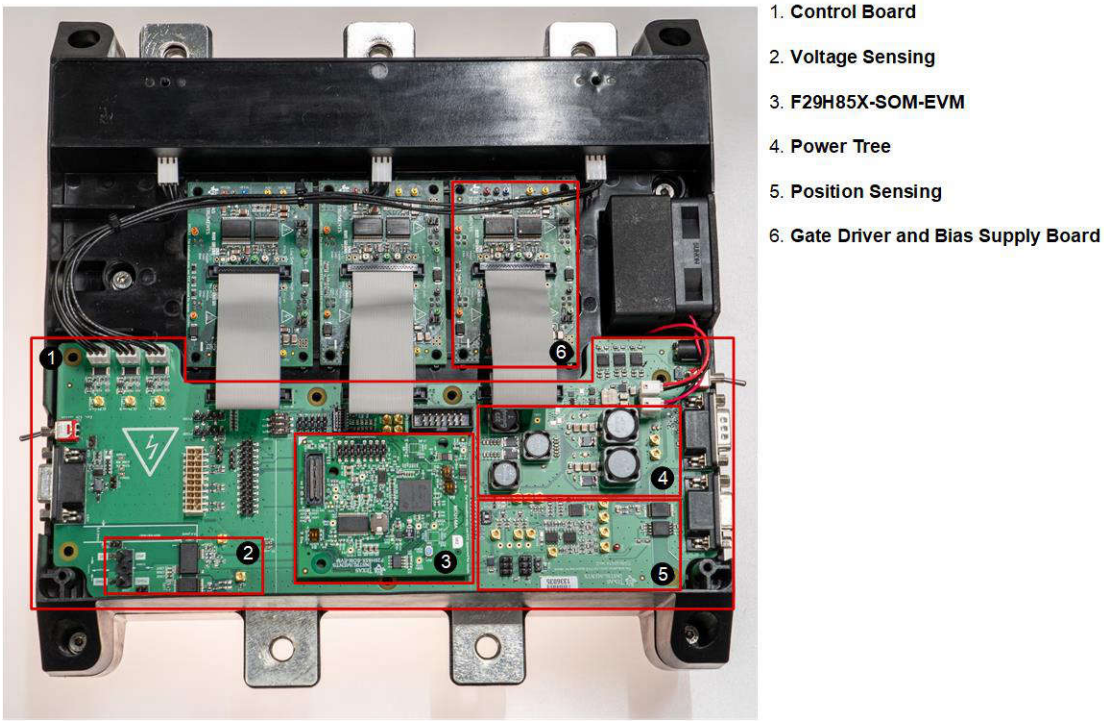


図 3-1. TIDM-02014 インバータ システムの機能セクション

3.1.1.1 制御ボード

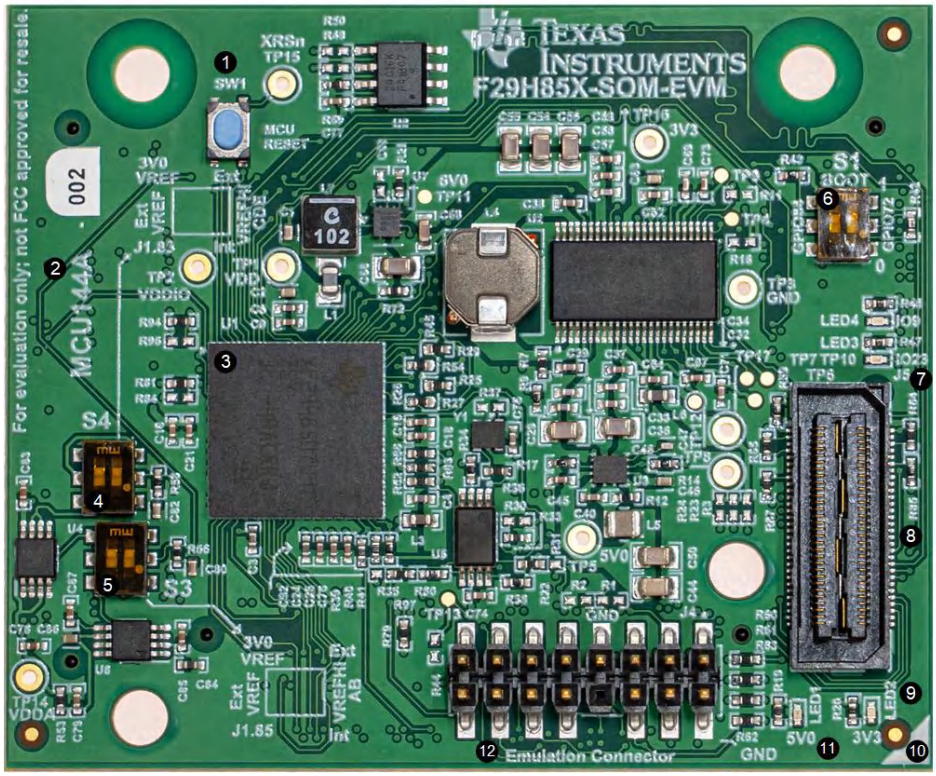
制御ボードには MCU SOM 制御ボードを搭載でき、補助電源および位置、電圧、電流のセンシング、通信のためのインターフェイスを提供します。制御ボードはゲートドライブとバイアス電源ボードとのインターフェイスとして機能し、MCU とゲートドライバ間の PWM と SPI 接続に電源を提供します。制御ボードには SOM 評価ボードを搭載できるため、同じボードを使用して、テキサス・インスツルメンツの F29H859TU-Q1 MCU を搭載した TIDM-02014 システムをテストできます。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

3.1.1.2 MCU SOM 評価ボード - C2000™

図 3-2 に、F29 SOM 評価ボ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、F29H85X controlSOM 評価ボード ユーザー ガイドを参照してください。



1. SW1 – MCU reset pushbutton
2. EVM Revision
3. U1 – F29H85x Microcontroller
4. S4 – ADC C/D/E VREF Selection Switch
5. S3 – ADC A/B VREF Selection Switch
6. S1 – Boot Mode Selection Switch
7. LED3/LED4 – GPIO9/GPIO 23 Connected User LEDs
8. J5 – DLT Header
9. LED2 – 3.3V Power Good LED
10. ControlSOM Orientation Marking
11. LED1 – 5V Power Good LED
12. J4 – XDS Debug Header

図 3-2. SOM 評価ボードの主要コンポーネント

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

3.1.1.3 ゲート ドライバとバイアス電源ボード

図 3-3 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。表 3-1J9 コネクタのピン配置を示します。

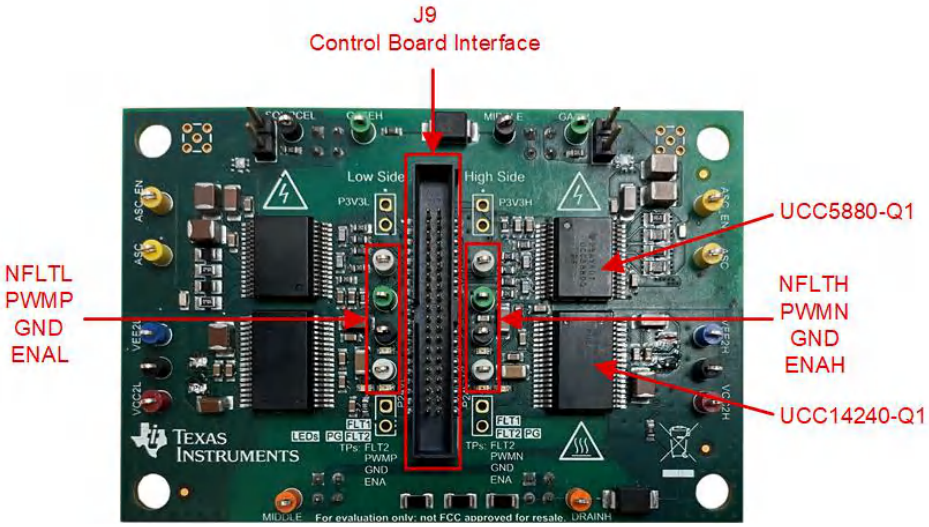


図 3-3. ゲート ドライバとバイアス電源ボード

表 3-1. 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

3.1.1.4 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印加され、AMC0386-Q1 または AMC0381D-Q1 デバイスに直接接続されます。これらのデバイスには高電圧抵抗ラダーが内蔵されており、出力から変調または差動の信号を供給して MCU に送信します。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

3.1.1.5 SiC パワー・モジュール

3.1.1.5.1 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、高品質のスイッチング 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 3-4 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 3-2 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 3-4. XM3 (左)、62mm (中央)、および EconoDUAL® (右) のサイズ比較

表 3-2. 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

3.1.1.5.2 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、ループが広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 3-5 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 3-6 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。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

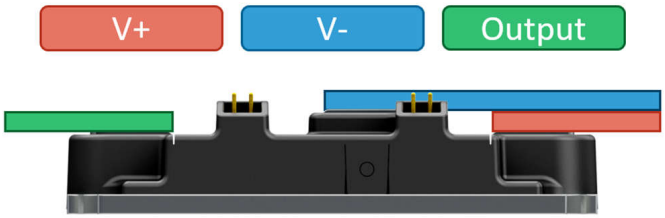


図 3-5. 非平面の電源リードを示した XM3 モジュールの側面図

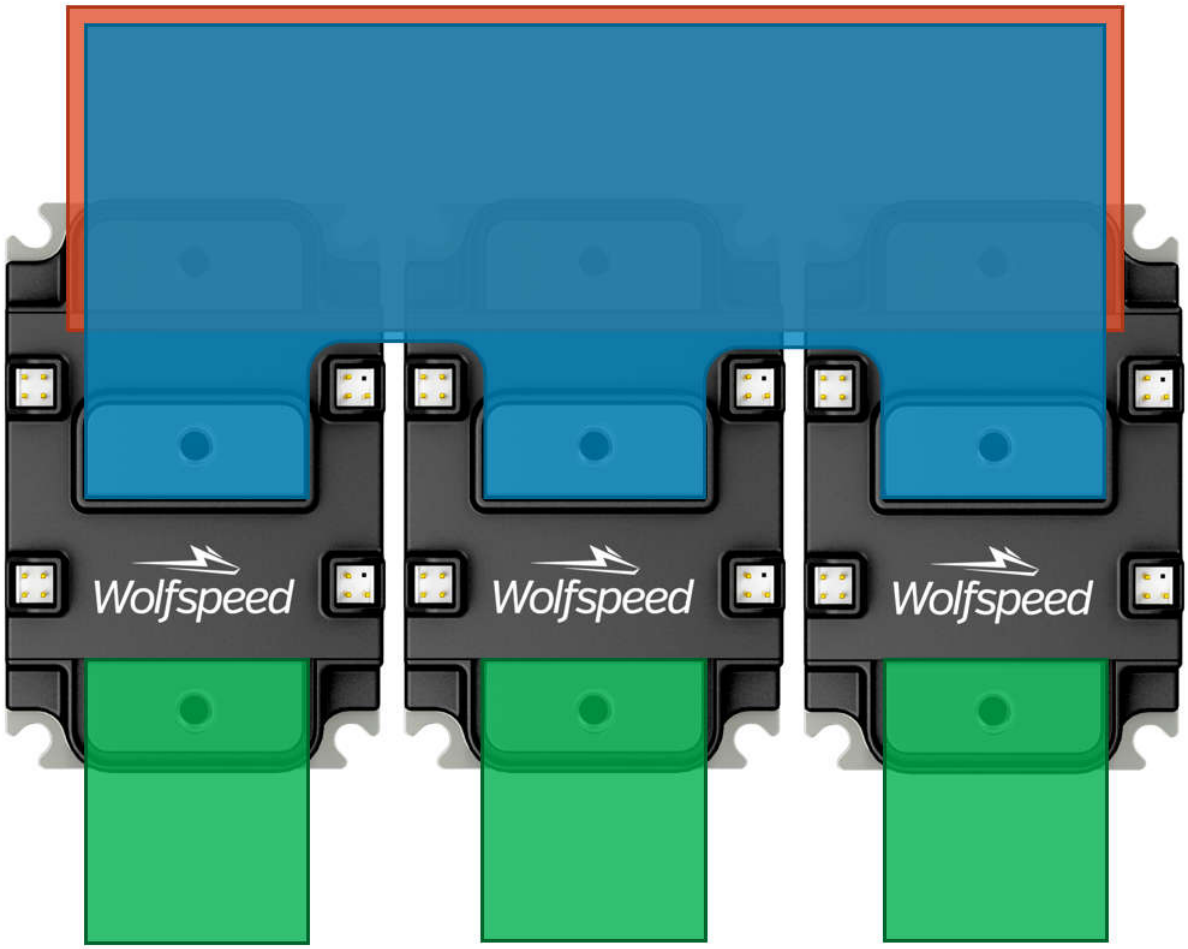


図 3-6. 3 相バス接続のレイアウト図

3.1.1.5.3 モジュールの信号端子

XM3 モジュールの信号ピンは、図 3-7 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 *DDESAT / 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、V_{DS} 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気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。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

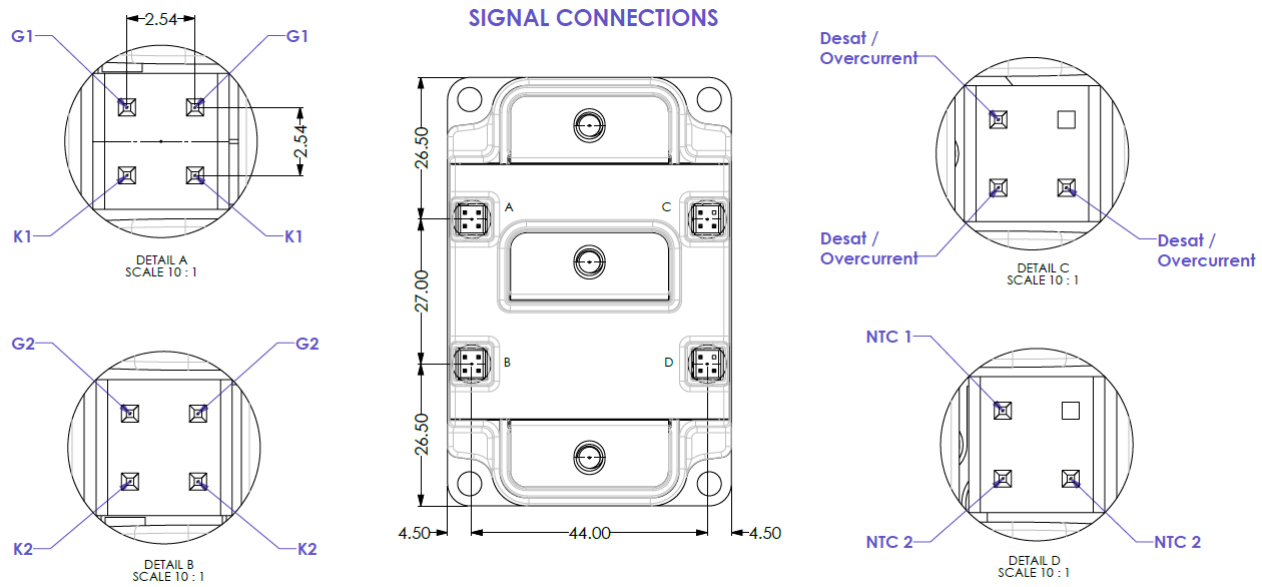


図 3-7. XM3 モジュールの信号端子のピン配置

3.1.1.5.4 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を通じて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気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っており、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。図 3-8 および表 3-3 に、NTC 信号周波数と NTC 温度の関係を示します。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。

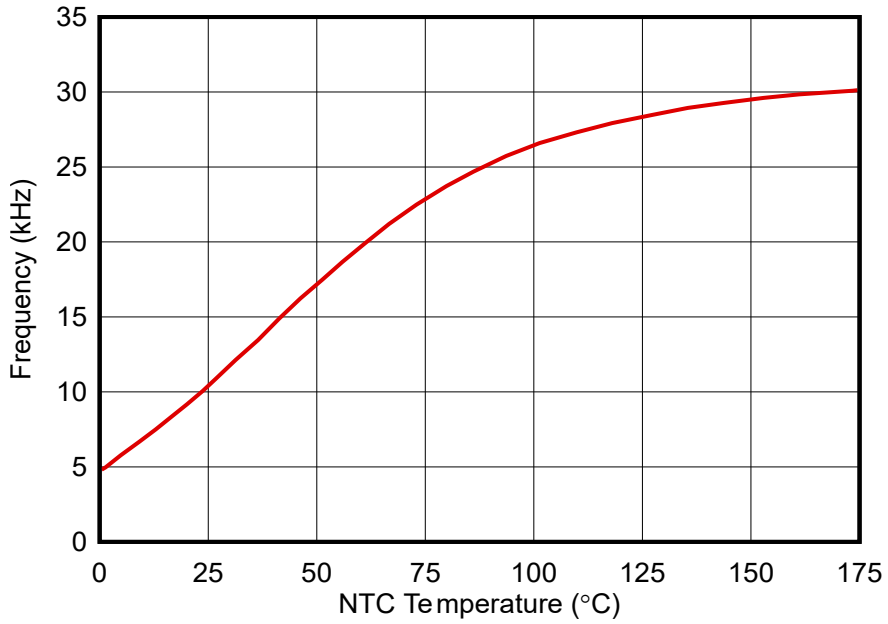


図 3-8. NTC 温度と信号周波数との関係

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 3-3. NTC の温度、抵抗、周波数の相関関係

NTC 温度 (℃)	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

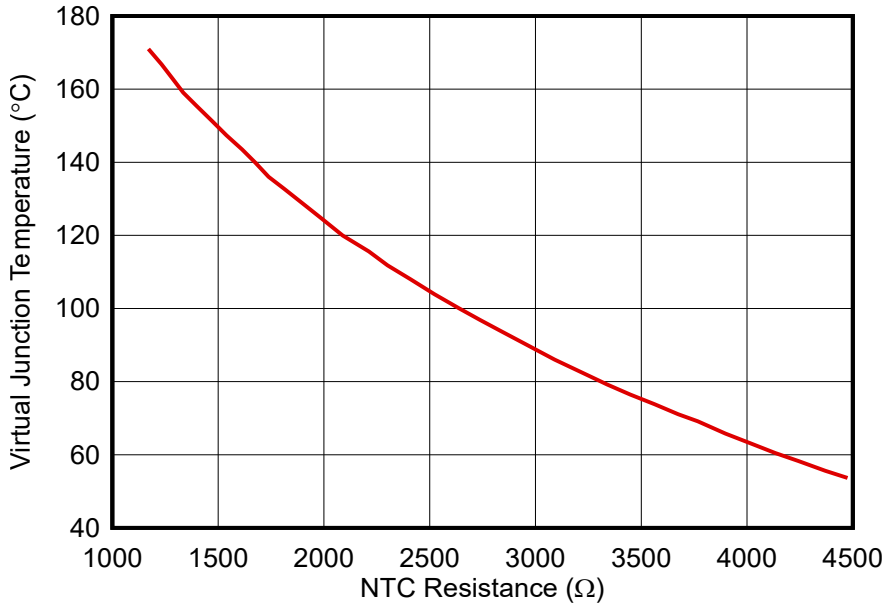


図 3-9. CAB450M12XM3 仮想接合部温度 (T_{VJ}) と 25℃ の冷却剤を使用した NTC 抵抗との関係

図 3-9 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。仮想接合部温度を計算するには、式 4 を使用します。

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

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、分圧器の中点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、式 5 を使用します。

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

3.1.1.6 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 3-10 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

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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、最低限の工程で製品を製造できるため、コストとリードタイムを削減できます。

図 3-10. 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 つのプロトタイプの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。

3.1.1.6.1 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。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

3.2 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。

3.2.1 絶縁型バイアス電源

図 3-11 に、検証済みの UCC14240-Q1 のスタートアップ動作を示します。

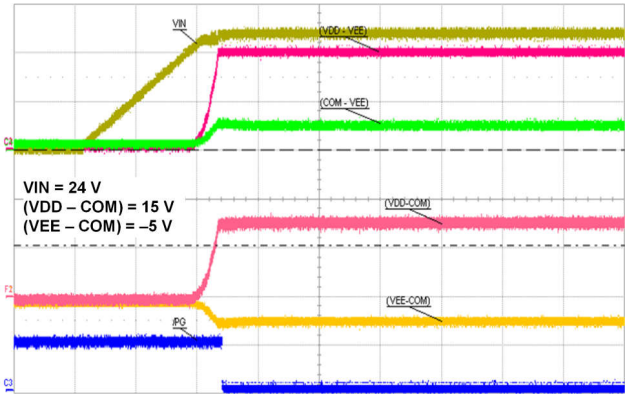


図 3-11. UCC14240-Q1 のパワーアップ シーケンス

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 0mA ～ 80mA です。表 3-4 に、測定された出力電圧を示します。

表 3-4. UCC14240-Q1 ロード レギュレーション

負荷 (mA)	V_{OUT} (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 です。式 6 は負荷レギュレーションの式です。

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

3.2.2 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。表 3-5 にテスト結果を示します。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

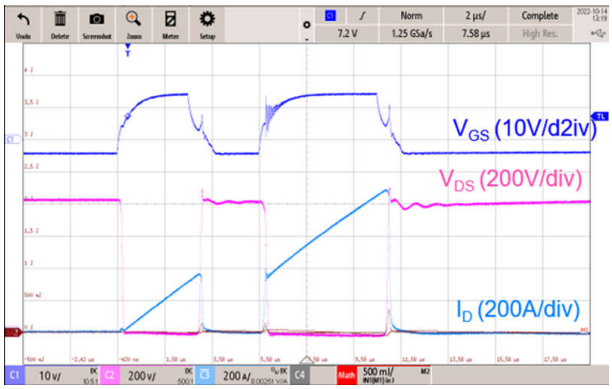


図 3-12. 駆動強度が弱いダブル パルス テスト

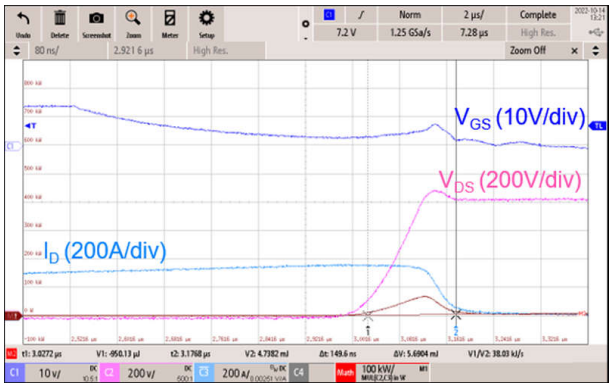


図 3-13. 弱い駆動強度のターンオフ波形

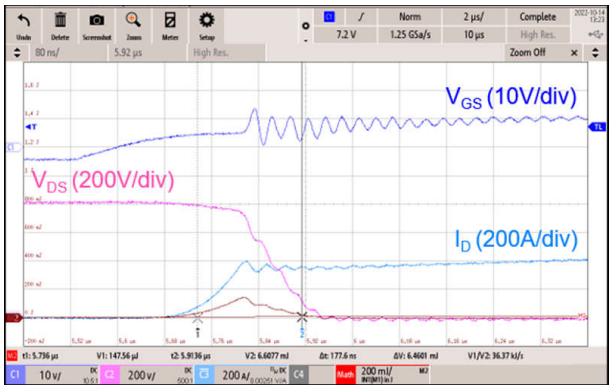


図 3-14. 弱い駆動強度のターンオン波形

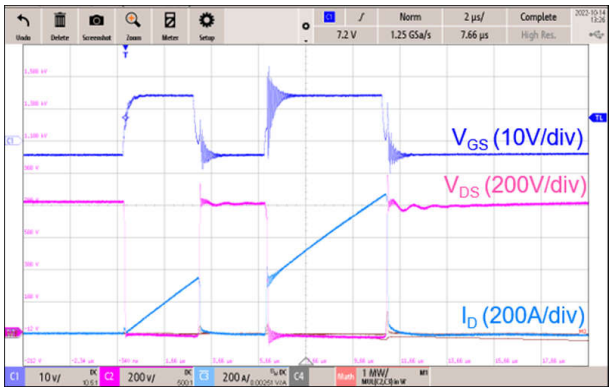


図 3-15. 強い駆動強度のダブル パルス テスト

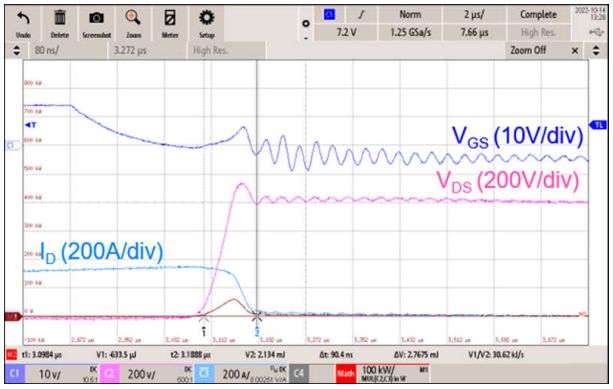


図 3-16. 強い駆動強度のターンオフ波形

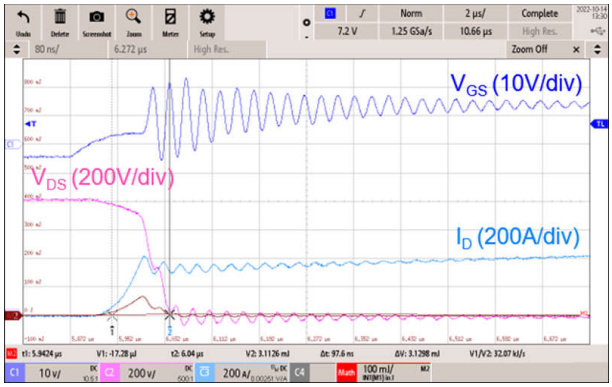


図 3-17. 強い駆動強度のターンオン波形

表 3-5. 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	5.65mJ	2.77mJ
ターンオン エネルギー	6.46mJ	3.13mJ

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

3.2.3 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能力が変更され、システムの効率に及ぼす影響が調べられています。以下の図に、SiC MOSFET のドレインソース間電圧 (V_{ds}) と位相電流のスコーププロットを示します。図 3-18 と図 3-19 に、弱いゲート駆動強度を持つテスト波形を示します。図 3-20 と図 3-21 に、強力なゲート駆動能力を持つテスト波形を示します。表 3-6 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 3-20 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。

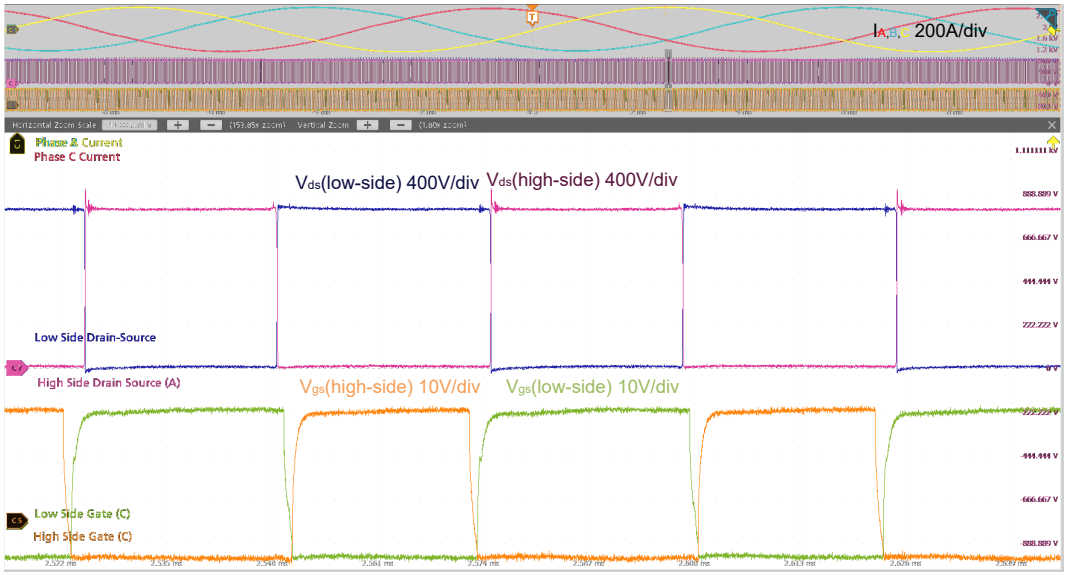


図 3-18. 弱いゲート駆動強度 (I_{RMS} = 285A) での電圧と位相電流の波形

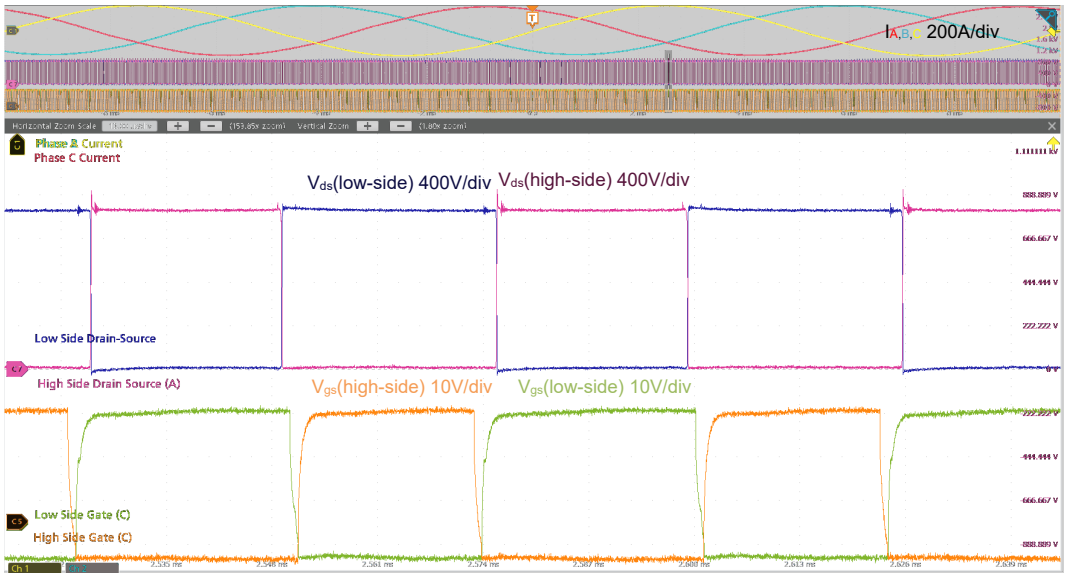


図 3-19. 弱いゲート駆動強度 (I_{RMS} = 320A) での電圧と位相電流の波形

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

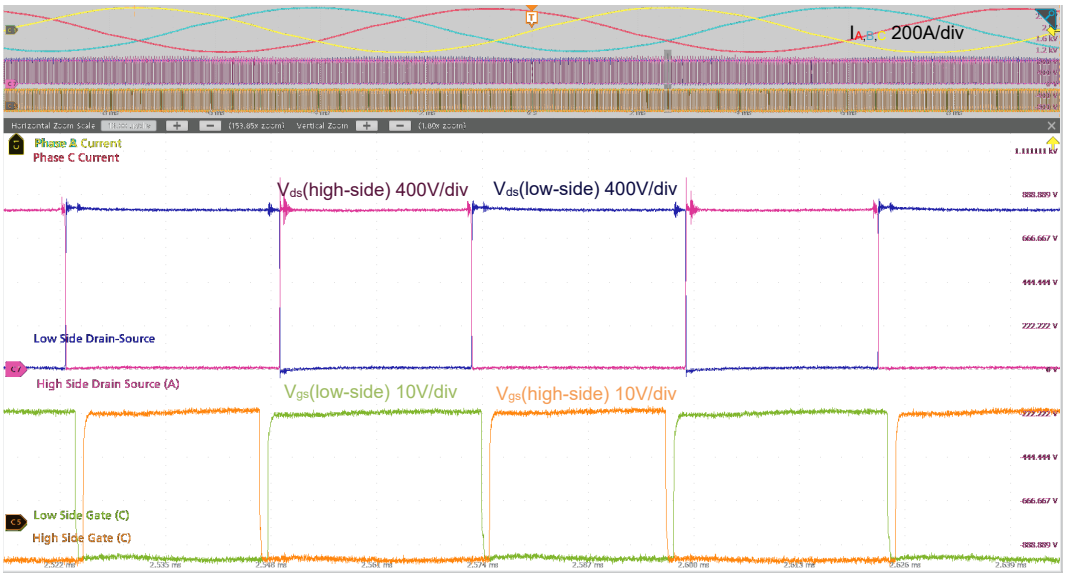


図 3-20. 強いゲート駆動強度 (I_{RMS} = 285A) での電圧と位相電流の波形

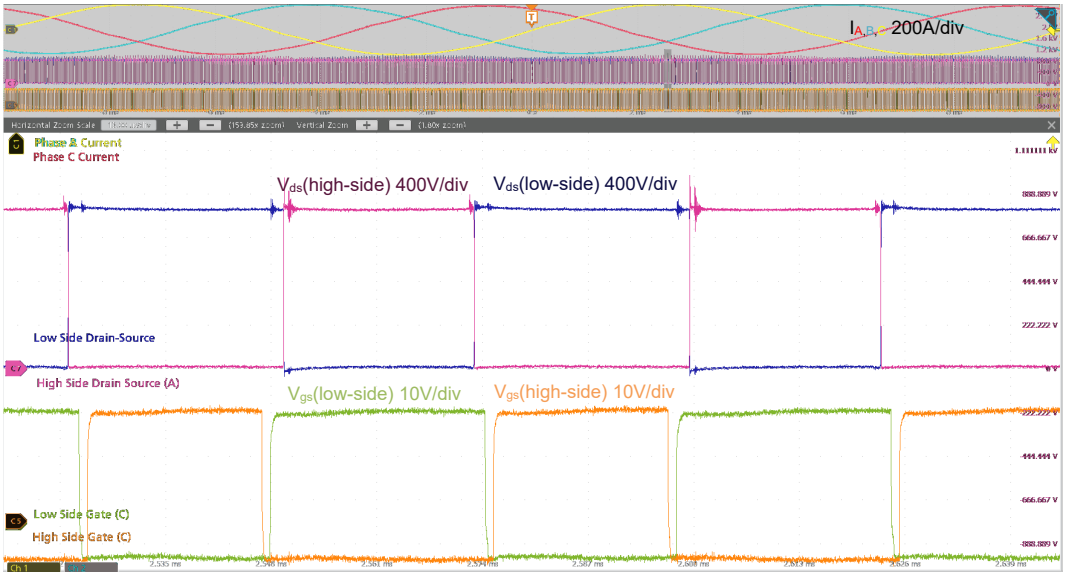


図 3-21. 強いゲート駆動強度 (I_{RMS} = 320A) での電圧と位相電流の波形

表 3-6. 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

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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気的定格電圧および電力制限範囲内で使用してください。電気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気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ブザーバーの立ち合いの下行います。
   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、不用意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気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. 電気的安全性
   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気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:

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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-02014 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-02014 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 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-02014 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-02014 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-02014 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-02014 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

F29H85X-SOM-EVM	F29H85X-SOM-EVM は、テキサス・インスツルメンツの C2000™ MCU F29H859TU-Q1 デバイスに適した評価 / 開発ボードです。3 つの 120 ピン高速高密度コネクタを搭載したシステムオンモジュール デザインにより、この EVM は初期評価とプロトタイプ製作に最適です。

ソフトウェア

F29-SDK	F29 SDK は、高性能リアルタイム制御アプリケーションの開発に適した包括的な各種ソフトウェア パッケージを実現できます。SDK には、ペリフェラル ドライバ、ライブラリ、FreeRTOS、®No-RTOS、MCAL、CDD、ツール、資料、およびデジタル電源アプリケーションとモーター制御アプリケーションを対象とした他のパッケージが含まれています。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

5.3 ドキュメントのサポート

1. Infineon® Technologies、*『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』*
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 ツール フォルダー*
3. Würth Elektronik®、*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. Würth Elektronik®、*仕様シート: 760390014*

5.4 サポート・リソース

テキサス・インスツルメンツ 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、設計で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、各寄稿者により「現状のまま」提供されるものです。これらはテキサス・インスツルメンツの仕様を構成するものではなく、必ずしもテキサス・インスツルメンツの見解を反映したものではありません。テキサス・インスツルメンツの使用条件を参照してください。

5.5 商標

E2E™, C2000™, and テキサス・インスツルメンツ E2E™ are trademarks of Texas Instruments.
EconoDUAL® is a registered trademark of Infineon Technologies Ag.
FreeRTOS、® is a registered trademark of Amazon Technologies, Inc.
Infineon® is a registered trademark of Infineon Technologies AG.
Würth Elektronik® is a registered trademark of Würth Elektronik GmbH & Co. KG.
すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

6 改訂履歴

資料番号末尾の英字は改訂を表しています。その改訂履歴は英語版に準じています。

Changes from Revision * (May 2023) to Revision A (May 2025) **Page**

- 設計ガイドを更新して、テキサス・インスツルメンツの F29H859TU-Q1、AMC0386-Q1、AMC0381D-Q1、UCC33421-Q1 デバイスに対するリファレンス デザインの変更を反映。MCU 評価向け制御カードは、F29H85X-PC-EVM に置き換えられています。 1
- 最新のデザイン ガイド標準に準拠するよう、ドキュメント全体を通して変更。 1

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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 テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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ます。

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 テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、テキサス・インスツルメンツの販売条件、または ti.com やかかる テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用される テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツ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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

テキサス· インスツルメンツは、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、 テキサス· インスツルメンツ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 テキサス· インスツルメンツ製品の選定、(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ます。

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 テキサス· インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、 テキサス· インスツルメンツ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。 テキサス· インスツルメンツ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、 テキサス· インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、 テキサス· インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス· インスツルメンツの製品は、 テキサス· インスツルメンツの販売条件、または ti.com やかかる テキサス· インスツルメンツ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。 テキサス· インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用される テキサス· インスツルメンツ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、 テキサス· インスツルメンツ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 © 2025, Texas Instruments Incorporated