

Design Guide: TIDA-010276

BLDC モーター制御用 36V、50A、3 相 GaN インバータのリファレンス デザイン



説明

この設計ガイドは、5 セルのリチウムイオン バッテリから 10 セルのバッテリー パックを使用して動作するコードレス ツール内にある 3 相ブラシレス DC モーターの駆動目的とした、36V、50A 窒化ガリウム (GaN) 電界効果トランジスタ (FET) 電力段を示します。このリファレンス デザインでは、GaN-FET ドライバを内蔵した LMG3100R017 GaN FET を使用して、モーター制御システムの効率と性能を向上させます。また、3.3V I/O インターフェイスと互換性のある TI BoosterPack™ プラグイン モジュールを搭載しており、C2000™ マイコン LaunchPad™ 開発キットや MSPM0 マイコン LaunchPad™ 開発キットに接続して、TI の GaN テクノロジーの性能評価を迅速かつ簡単に実行できます。

リソース

TIDA-010276

デザイン フォルダ

LMG3100、LMR38010

プロダクト フォルダ

TPS7B8150、OPA4323

プロダクト フォルダ

LAUNCHXL-F2800137

プロダクト フォルダ

LP-MSPM0G3507

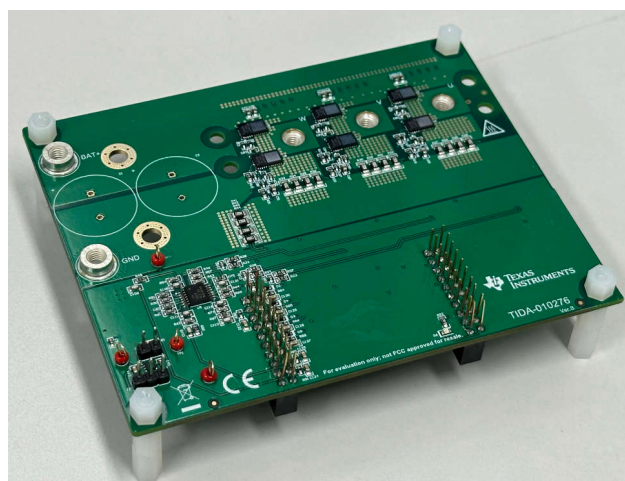
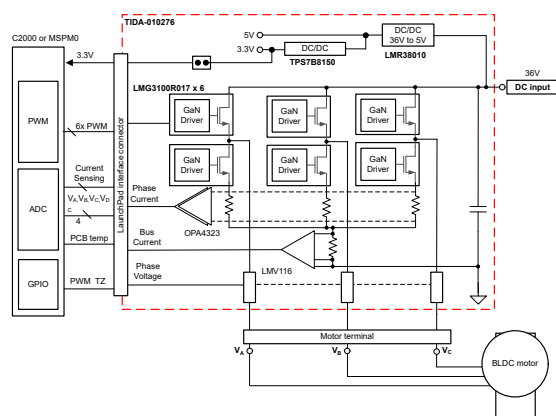
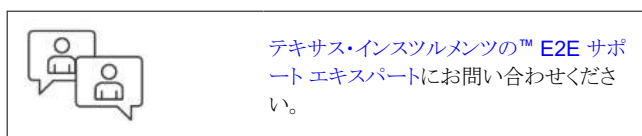
プロダクト フォルダ

特長

- ドライバを内蔵した 6.50mm × 4.0mm の LMG3100R017 GaN FET により、高い電力密度と簡単な PCB レイアウトを実現
- 20kHz の PWM 使用時に高効率 (99% 超のピーク) を達成し、ヒートシンクなしで周囲温度 25°C で最大 50A のピーク電流で動作可能、50A のピーク電流で 80kHz の PWM 使用時に 98.5% の効率
- LMG3100R017 は、電解コンデンサをセラミック コンデンサに置き換えることで、DC バス コンデンサのサイズと高さを削減し、より高い PWM 周波数で動作可能
- 逆回復損失がゼロで、スイッチ ノードの発振が低減
- 短いデッド タイムにより位相電圧の歪みを最小化
- 高い PWM 周波数で高速モーター制御をサポート
- ローサイド電流サンプリングを使用し、位相電圧サンプリングを追加することで、センサレス磁界方向制御 (FOC) またはセンサレス台形波制御の検証をサポート

アプリケーション

- コードレス ハンディタイプ園芸用器具
- コードレス電動工具
- コードレス掃除機
- 芝刈り機



1 システムの説明

ドリル、粉碎、切削、研磨、締め具の駆動などの電動工具は、さまざまな産業や家庭で使用されています。最も一般的な電動工具では電動モーターを使用していますが、中には内燃エンジン、蒸気エンジン、圧縮空気を使用するものもあります。電動工具は、コード付きまたはコードレス (バッテリー駆動) のいずれかです。コード付き電動工具は、主電源 (グリッド電源) を使用して AC または DC モーターに電力を供給します。

コードレス工具は、バッテリー電源を使用して DC モーターを駆動します。コードレス工具のほとんどは、業界でも最先端の高エネルギー密度、軽量、長寿命を実現したリチウムイオン電池が使用されています。電動工具には、さまざまな種類の電力レベルとバッテリー電圧レベルがあります。コードレスのチェーンソーや丸のこぎりなどの電動工具、コードレスの木材や枝の伐採道具などの園芸用器具は、非常に高いトルクと高ピーク電流が必要です。

コードレス工具には、ブラシ付き、またはブラシレス (BLDC) モーターが使用されます。BLDC モーターは効率がよく、メンテナンス性に優れ、低ノイズ、長寿命を実現しています。電動工具には、フォーム ファクタ、小売り湯性、ピーク電流、信頼性、熱性能に関する要件があります。そのため、電動工具のモーターの駆動にはコンパクトなサイズの高効率な電力段が必要です。電力段のフォーム ファクタが小さくなることにより、柔軟な取り付けが可能になり、PCB レイアウト性能は向上し、設計のコストが低減します。高効率のため、バッテリーの持続時間は最大化し、冷却の手間は軽減します。それに対し、高効率の要件として、低ドレイン - ソース間抵抗 ($R_{DS(on)}$) を搭載したスイッチング デバイスが必要になります。また、電力段は、モーター ストールや何らかの原因による大電流防止などの保護機能が利用できる必要があります。

この設計は、複数の GaN FET、より高いパルス幅変調 (PWM)、最大 100kHz のスイッチング周波数を使用して、DC バス コンデンサのサイズを縮小する方法を採用しています。これらの機能により、電解コンデンサをセラミック コンデンサに置き換えることでサイズと高さを低減し、効率が向上することでヒートシンクの面積をさらに削減できるため、PCB の重量を削減できます。さらに、特に低インダクタンスのブラシレス AC モーターでより精密な制御を実現できるよう、モーターの電流、さらにはトルクリップルを低減するために、より高い PWM スwitching 周波数が求められます。

TIDA-010276 のリファレンス デザインは、3 相インバータ向けに小型サイズの GaN-FET LMG3100R017 を使用しています。LMG3100R017 は、ドライバと 80V GaN FET を小型の 6.5mm × 4mm QFN パッケージに統合しており、ゲート ループと電源ループのインピーダンスが極めて低くなるよう最適化されています。PCB には、上面冷却タイプの LMG3100R017 GaN-FET パワー モジュールとともに取り付けるヒートシンク用の取り付け穴があります。内蔵のブートストラップ ダイオードにより、ハイサイド GaN-FET バイアス電源のスペースをさらに削減することができます。この設計では、ローサイド電流サンプリングとバス電流サンプリングを行い、バス電流に対する過電流保護を追加しています。さらに、DC バス電圧と、PWM フィルタリング処理された 3 相電圧も設計に追加しており、InstaSPIN-FOC™ のような高度なセンサレス設計の検証が可能です。この 3 相インバータは 12V~48V の広い入力電圧範囲で動作し、LMG3100 ゲートドライバに 5V レールを、電流センシング アンプと温度検出に 3.3V レールを供給するオンボード パワーマネージメントを備えています。TIDA-010276 はテキサス インスツルメンツの BoosterPack プラグイン モジュールと互換の 3.3V I/O インターフェイスを採用しており、C2000 MCU LaunchPad または MSPM0 LaunchPad と接続して、迅速で容易な性能評価を可能にします。

1.1 主なシステム仕様

TIDA-010276 小型フォーム ファクタ 3 相 GaN インバータのリファレンス デザインの主な仕様を [表 1-1](#) に示します。この設計は、C2000 MCU、MSPM0 LaunchPad 開発キット、40 ピン インスタンス (J1～J3 および J4～J2) に直接接続できます。TIDA-010276 には、LaunchPad に 3.3V を供給するためのジャンパ オプションが含まれています。

表 1-1. 主なシステム仕様

パラメータ	仕様
入力電圧	36V DC (最小 12V～最大 48V) - 10 セル リチウムイオン
定格出力電力	1800 W
電流	50A
位相電流最大範囲	±66A
パワー FET のタイプ	GaN 技術
制御方式	センサベース、センサレス台形波制御、または センサベース、センサレス FOC
インバータ スイッチング周波数	10kHz～100kHz
フィードバック信号	DC バス電圧、ローサイド バス電流、ローサイド位相電流、位相電圧、ホール センサ (LaunchPad 開発キットに接続)
PCB 層構成	4 層、2 オンスの銅
GaN FET PCB 面積	18mm × 58mm
基板仕様	90mm × 112mm
動作時周囲温度	–20°C ～ 55°C

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ことを想定し、この基板を一般消費者向けの完成品とはみなしていません。

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専門家のみが使用することを想定しています。

表面は高温！ 触れるとやけどの原因になることがあります。**触れないでください！** 基板の電源を入れると、一部の部品は 55°C を超える高温に達することがあります。動作中は常に、また電源オフ後すぐは高温になっているため、基板に触れないでください。

注意

電源を入れたままその場を離れないでください。

2 システム概要

2.1 ブロック図

図 2-1 は、TIDA-010276 を赤い点線枠で示した 3 相 GaN インバータのシステム ブロック図です。

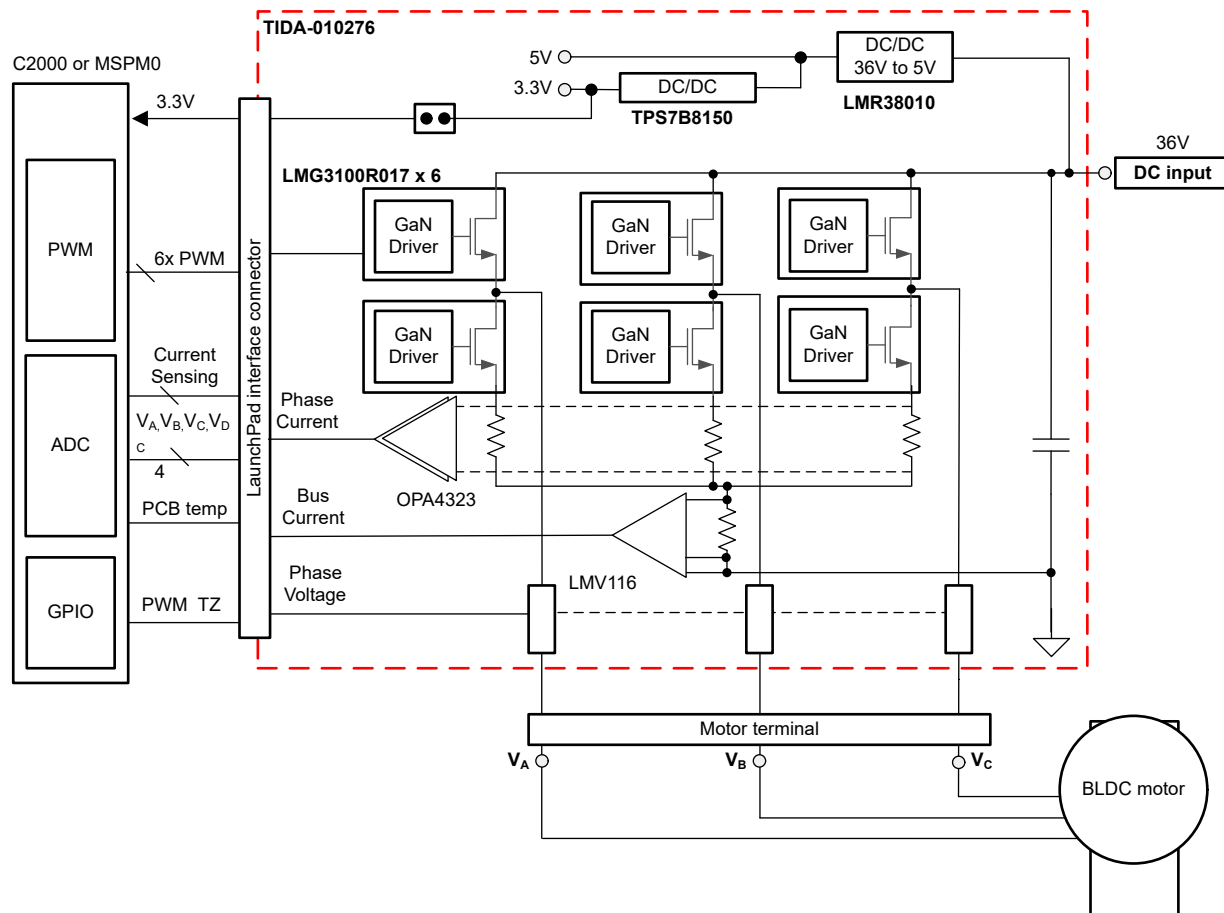


図 2-1. TIDA-010247 のブロック図

2.2 システム概要

リファレンス デザインには以下のサブブロックが含まれています。

- GaN FET を採用した 3 相電力段
- DC/DC コンバータ LMR51606 は、GaN-FET パワー モジュールと、電流センス アンプと温度センサ用の 3.3V LDO に電力を供給する 5V レールを生成します
- DC バス電圧、ローサイド バス電流、ローサイド位相電流、位相電圧センシング
- オンボード温度センサを使用した MOSFET 温度検出
- 必要なモーター制御アルゴリズム、検出、保護を実装するホスト コントローラ

2.3 主な使用製品

このリファレンス デザインでは、以下の主な製品を使用しています。次のセクションでは、このリファレンス デザインで使用するデバイスを選択するための主な機能について説明します。主なデバイスの詳細については、それぞれの製品データシートを参照してください。

LMR38010 は、高精度イネーブルを使って幅広い入力電圧と直接接続でき、またデバイスのスタートアップとシャットダウンを精密に制御できるため、設計の柔軟性を高めることができます。内蔵のフィルタと遅延を備えたパワー グッド フラグは、システムの実際の状態を示すため、外部のスーパーバイザは不要です。このデバイスは疑似ランダム拡散スペクトラムを内蔵し、EMI を最小限に抑えます。また、200kHz~2.2MHz の広い範囲でスイッチング周波数を構成し、ノイズの影響を受けやすい周波数帯を避けることができます。また、効率向上のために低い動作周波数を選択することも、設計小型化のために高い動作周波数を選択することも可能です。

このデバイスには、サイクル単位の電流制限、ヒカップ モード短絡保護、過剰な電力消費時のサーマル シャットダウンなどの保護機能が組み込まれています。LMR38010 は、8 ピン HSOIC PowerPAD™ IC パッケージで供給されます。

2.3.3 TMP61

TMP61 は、正温度係数 (PTC) を持つ、リニア シリコン サーマスタです。このデバイスは温度依存抵抗として動作し、システムレベルの要件に応じて、さまざまな構成で温度を監視できます。TMP61 の 25°C での公称抵抗値は 10kΩ で、最大許容誤差が ±1%、最大動作電圧は 5.5V、最大電源電流は 400μA です。このデバイスには、追加の線形化回路が不要、キャリブレーションが最小限、抵抗公差の偏差が小さい、高温での感度が高い、変換方式が簡単などの利点があるため、プロセッサ内の時間とメモリを削減できます。このデバイスは、さまざまなアプリケーションで、標準的な 0402 フットプリントと互換性のある超小型 DEC パッケージ オプションがある場合に、熱源付近の温度監視に使用できます。

2.3.4 TPS7B81

TPS7B81 は、最高 40V の入力電圧で動作し、最大 150mA の電流を供給できる低ドロップアウト (LDO) リニア レギュレータです。軽負荷時の静止電流がわずか 2.7μA であるため、入力電源電圧範囲の広い設計や、スタンバイ時消費電力が非常に小さいことが要求される多セル バッテリ駆動アプリケーションに最適です。45V の過渡電圧に耐えられるので、誘導性キックバックが発生する可能性のあるアプリケーションでヘッドルームが増え、電圧抑制のための外付け回路を減らすことができます。

TPS7B81 には短絡および過電流制限機能が内蔵されているため、フォルト状態でもシステムを保護できます。スタンバイ時の消費電力が小さいことに加えて、軽負荷時のドロップアウト電圧が非常に小さいため、消耗したバッテリーで動作する場合でもレギュレーションを維持できます。

TPS7B81 は、熱的に強化された 8 ピンの HVSSOP および 6 ピンの WSON パッケージで供給されます。どちらのパッケージも熱伝導性が高くサイズが小さいため、小型の設計が可能であり、電動工具、モーター ドライブ モジュール、バッテリー パックなど、スペースに制約のあるアプリケーションに適しています。

2.3.5 OPA4323

OPA4323 デバイスは、ゼロクロスオーバー入力段とレール ツー レール出力段を備えた、低電圧 (1.7V~5.5V)、広帯域 (20MHz) アンプ (オペアンプ) です。ゼロクロスオーバー入力段により、OPAx323 は ADC ドライバ アプリケーションで一般的なレール ツー レール スイングを備えた入力信号について、高い直線性と低い歪みを実現できます。20MHz のゲイン帯域幅により、必要なセトリング性能に応じて 0.5MSPS~5MSPS の ADC サンプルング速度で、高速なセトリング応答が得られます。OPA4323 は、標準値の静止電流がわずか 1.6mA であり、消費電力削減に最適化されています。

OPA4323 は 33V/μs の高いスルーレートを実現しているため、モーター電流センシング アプリケーションでフォルトを高速検出できます。従来のアンプとは異なり、ゼロクロスオーバー入力段により、ローサイドとハイサイド両方のセンシング アプリケーションで同一の精度性能が得られるため、OPA4323 はソーラー スtring インバータ、電力供給、グリッド、高速モーター制御などさまざまな最終製品の電流検出に最適です。

3 システム設計理論

3.1 電力段の設計: 3 相インバータ

公称 36V の DC 入力電圧は、 $2 \times 1000\mu\text{F}$ の電解コンデンサと $40 \times 10\mu\text{F}$ セラミック コンデンサでバッファされ、合計 $2400\mu\text{F}$ の DC バス容量となります。この設計は、セラミック コンデンサのみ、または電解コンデンサのみでテストできます。必要に応じて、電解コンデンサまたはセラミック コンデンサの数を減らすことができます。この場合、DC バス容量の低減におけるスイッチング周波数の上昇による影響を評価できます。PCB では、電源グランド (PGND) とロジック グランドまたはアナログ グランド (GND) という 2 つの独立したグランド プレーンが用いられています。電源グランド プレーンからロジック プレーンへの高いスイッチング周波数電流のクロストークを最小限に抑えるため、両方のグランド プレーンはネットタイを介して接続されています。オプションとして、セラミックコンデンサのみ、または電解コンデンサのみで PCB をテストできます。

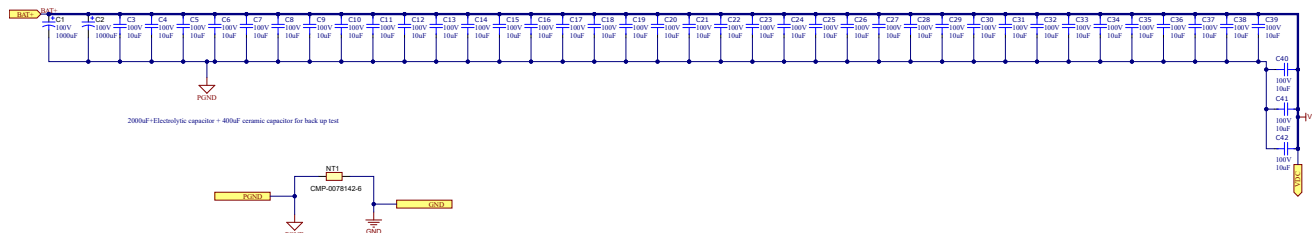


図 3-1. TIDA-010276 の DC バスのデカップリングと GND の方式

3.2 LMG3100 GaN FET 電力段

LMG3100 にはハイサイドのレベル シフタとブートストラップ回路が組み込まれているため、追加のレベル シフタを必要とせずに、2 つの LMG3100 デバイスを使用してハーフブリッジを形成できます。高集積化により PCB 面積はさらに縮小され、追加に必要な受動部品もわずかです。図 3-2 に、ハーフブリッジの回路図を示します。

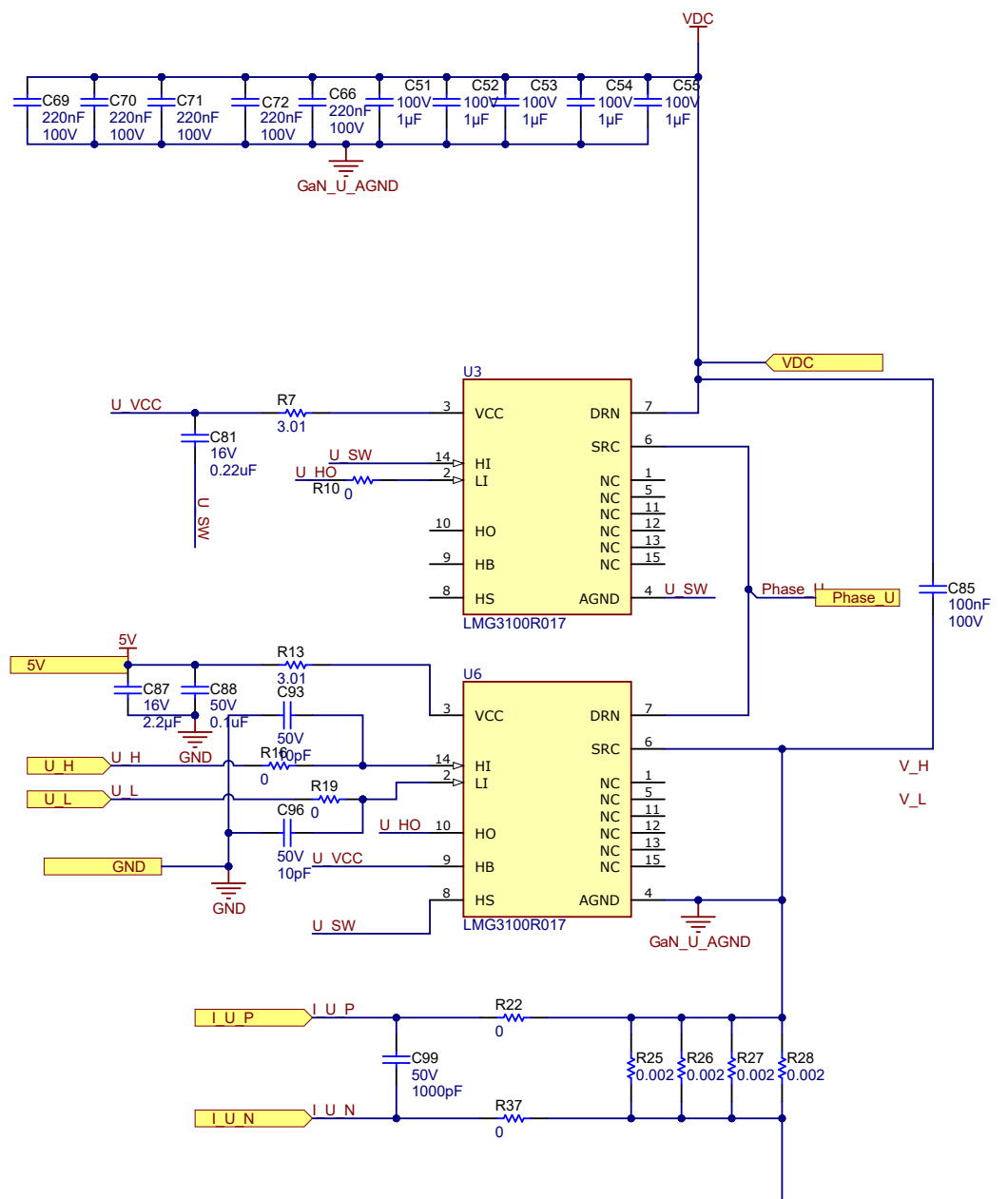


図 3-2. 位相 U の TIDA-010276 GaN 電力段の回路図

36V DC リンク電圧は、LMG3100 の VIN ピンに接続され、電源グラウンド (PGND) ピンを基準としています。ローカル セラミック バイパス コンデンサ C51、C52、C53、C54、C55 (1 μ F) および C69、C70、C71、C72、C66 (220nF) は、ループ インダクタンスを最小限に抑えるために、VIN ピンと AGND ピンの間に並列に近接して配置されています。また、スイッチのノイズを低減するために、ハーフブリッジ DRN と SRC にコンデンサ C85 を追加しています。

LMG3100 に内蔵されたゲートドライバには 5V が供給されます。1 μ F と 0.1 μ F のセラミック バイパス コンデンサ (C130、C86) は、データシートで推奨されているように、ローサイド GaN FET において VCC ピンと AGND ピンの近くに配置されています。100nF のセラミック ブートストラップ コンデンサ (C95) は、ハイサイド ゲートドライバのブートストラップ レール およびハイサイド GaN-FET のソース接続ピンの近くに配置されています。VCC パスの R6 と R12 により、GaN FET のターンオン時のスルーレートが制限される可能性があります。この設計では、R5 と R7 のテストに 3 Ω 抵抗を使用しました。PWM バッファからのハイサイド スイッチとローサイド スイッチに対する相補型 PWM 信号は、R15、C89 と

R18、C92 でローパス フィルタ処理され、高周波のインパルス ノイズが除去されて、約 160MHz のカットオフ周波数と約 1ns の伝搬で誤ったスイッチングが防止されます。これはハーフブリッジ アプリケーションなので、ハイサイド GaN FET の AGND をローサイド DRN ピンに接続します。ローサイド電流サンプリングが使用されるため、AGND をサンプリング抵抗の上限に接続し、サンプリング抵抗の電圧降下をできるだけ小さくするようにします。

レイアウトの場合、コンデンサ C55～C69 を AGND ネットワークに接続し、接続をできる限り短くする必要があります。C85 を、位相 U ネットワークにできるだけ近づけて接続してください。

3.3 パワー マネージメント

電源ツリーを、図 3-3 に示します。入力電圧範囲の広い DC/DC 降圧コンバータを使用して、5V レールを生成します。その後、パワーモジュールは 5V から 3.3V を生成し、OPA4323 などの 3.3V シグナル チェーンに電力を供給します。J1 または J2 を使用して LDO を直接無効化し、GaN、OPA4323、その他の回路に 5V を供給できます。

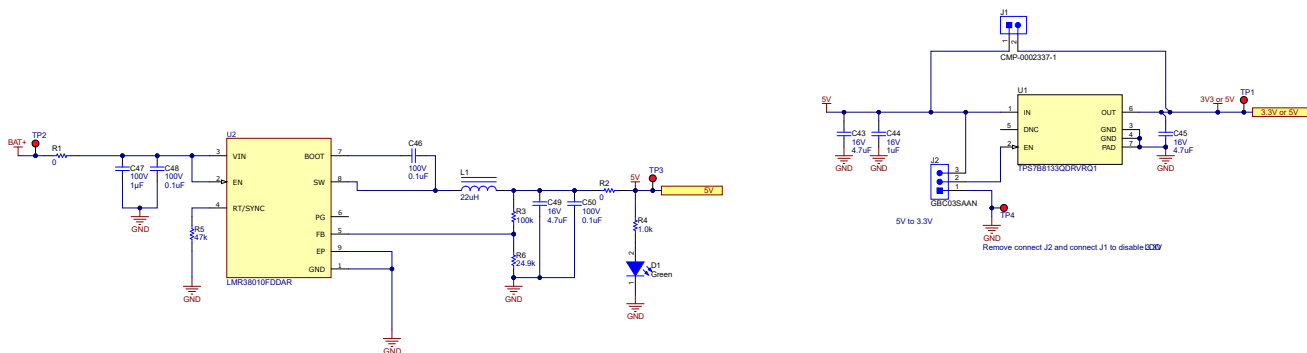


図 3-3. TIDA-010276 DC/DC および LDO

3.4 電流検出回路

このリファレンス デザインは、オペアンプを使用したバス電流とローサイド電流のセンシングもサポートしています。デフォルトでは 0.5mΩ サンプリング抵抗を使用しており、この設計では差動サンプリングを使用しています。差動サンプリングゲインは、R54、R62、R47 を変更することで変更できます。この設計のデフォルトゲインは 51、電流範囲は ±64.7A (3.3V の場合)、±98A (5V の場合)、カットオフ周波数は約 100kHz です。

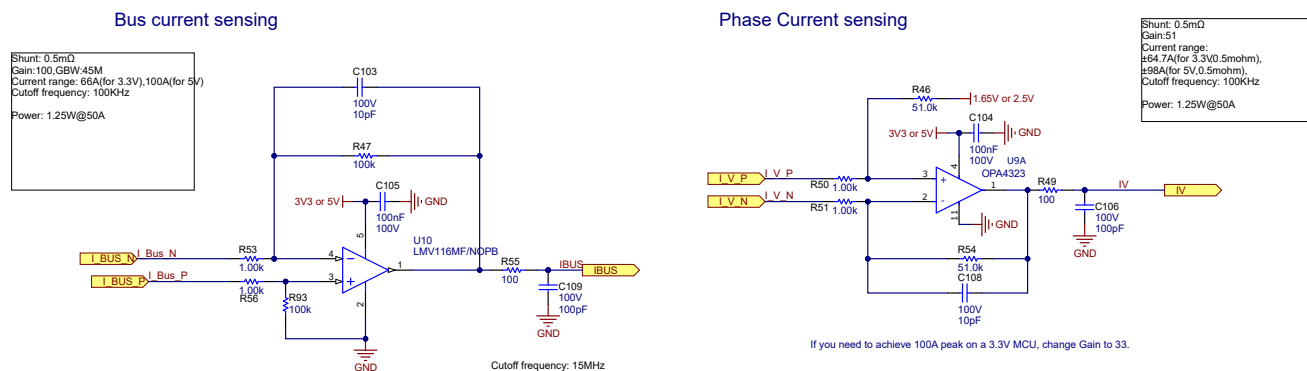


図 3-4. TIDA-010276 による電流検出

3.5 過電流保護回路

TI では、過電流保護のハードウェア回路を設計しました。LM393 をコンパレータとして使用し、過電流保護スレッショルドは R65 と R70 により設定されています。デフォルトは 6A (3.3V の場合)、9A (5V の場合) です。ハードウェアが正常であることを確認してから、テスト用に R65 と R70 をそれぞれ 1kΩ と 10kΩ に変更してください。

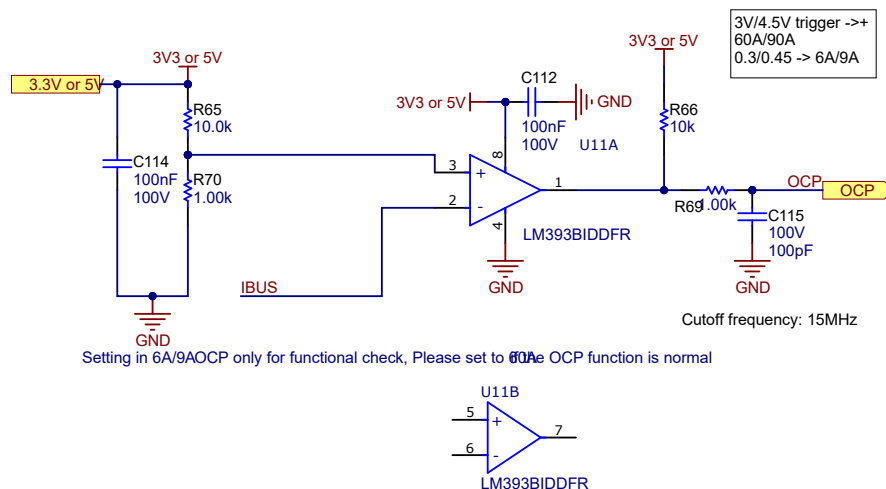


図 3-5. 過電流保護のハードウェア回路

3.6 位相電圧および DC 入力電圧のセンシング

各位相の位相電圧と DC リンク電圧 (入力電圧と等しい) は、抵抗分圧器を介してセンシングされます。図 3-6 に、PWM キャリア周波数を減衰させるローパス フィルタ (C107) を使用した DC リンク電圧 (R48、R52) の例を示します。位相電圧は、絶対最大電圧を 80V として、3.3 V にスケールリングされます。

80V (abs max) scaled to 3.3V
80V->3.23V, 48V->1.94V, 36V
->1.45V

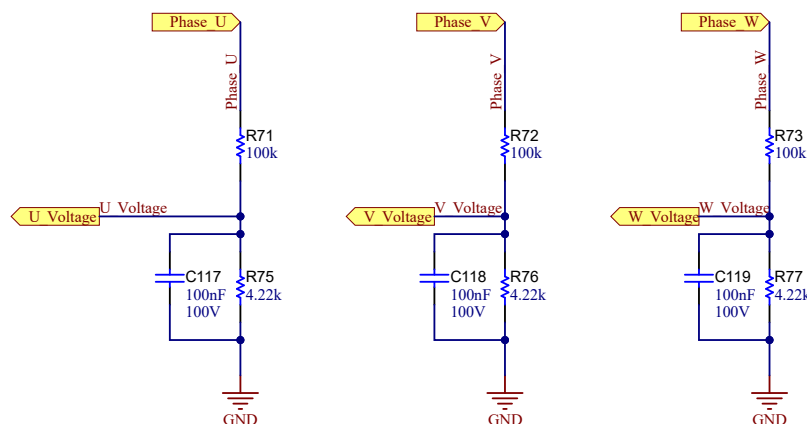
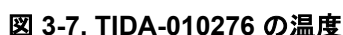


図 3-6. TIDA-010276 の位相電圧および DC 入力電圧のセンシング

3.7 電力段の PCB 温度監視

PCB 電力段の温度をセンシングするために、0402 および 0603 のパッケージオプションで 0°C~+70°Cまでで $\pm 1\%$ を実現している TMP61 ファミリのサーミスタが選択されています。TMP6131 デバイスは、LMG3100 の近くに配置されています。設計ツールに基づいて、プルアップ抵抗として 10k Ω 抵抗を選択します。TMP6131 のアナログ出力信号は、R87 (20 Ω) と C123 (2.2nF) でローパス フィルタ処理され、コネクタ J1-11 に配線されて C2000 MCU 内蔵 ADC に接続されます。この信号を使用して、C2000 MCU を介してリアルタイムの PCB 温度センシングと過熱保護を行うことができます。



C2000 MCU など、ホスト プロセッサとのインターフェイスは 3.3V I/O に準拠しており、位相 U、位相 V、位相 W の相補型 PWM 信号、PWM トリップ信号、ディスエーブル信号、さらに、3 相 GaN インバータを制御するための高精度の位相電流、位相電圧、DC リンク電圧フィードバックなど、必要なすべての信号を提供します。アナログ PCB 温度帰還 (temp) は、さらに 3 相 GaN 出力段を保護し、安全動作領域 (SOA) を調整するのに役立ちます。各アナログ フィードバック信号は、MCU 内蔵 ADC に接続する前に、たとえば R90 (20Ω) や C125 (2.2nF) などの RC フィルタでローパス フィルタ処理されます。2.2nF のコンデンサは、通常 5pF~15pF の範囲にある ADC のスイッチ入力コンデンサの駆動用に配置されています。ショットキー ダイオード D2~D6 は、DC バス電圧が 80V (絶対最大値) を超えた場合に、最大位相電圧を約 3.6V にクランプします。TIDA-010276 は、LAUNCHXL-F2800137 などの 80 ピン C2000 MCU LaunchPad の上部ヘッダにのみ取り付け可能です。さらに、TIDA-010276 ホスト インターフェイスを使用すると、C2000 LaunchPad に電力を供給するために 3.3V レールを供給するオプションを利用できます。このオプションは、システム全体の適切なパワーアップ シーケンシングを提供します。



4 ハードウェア、テスト要件、およびテスト結果

4.1 ハードウェア要件

4.1.1 TIDA-010276 の PCB の概要

図 4-1 および図 4-2 に、PCB の上面および底面のラベル付き写真を示します。以下に、これらの部品について説明します。

- 電源用 2 端子入力: このピンを使用して、バッテリーと入力 DC 電源を接続します。
- モータ巻線接続用 3 端子出力: 3 相 BLDC モーター巻線に接続するための位相出力接続で、U、V、W と書かれています
- BAT+/GND に近い 2 ピン コネクタ: セラミック コンデンサ PCB の接続に使用
- コネクタ J1-J3、J4-J2: MCU 接続に使用
- 2 ピン コネクタ J1: バイパスに接続可能
- 3 ピン コネクタ J2: LDO をイネーブルまたはディスエーブルする場合に使用

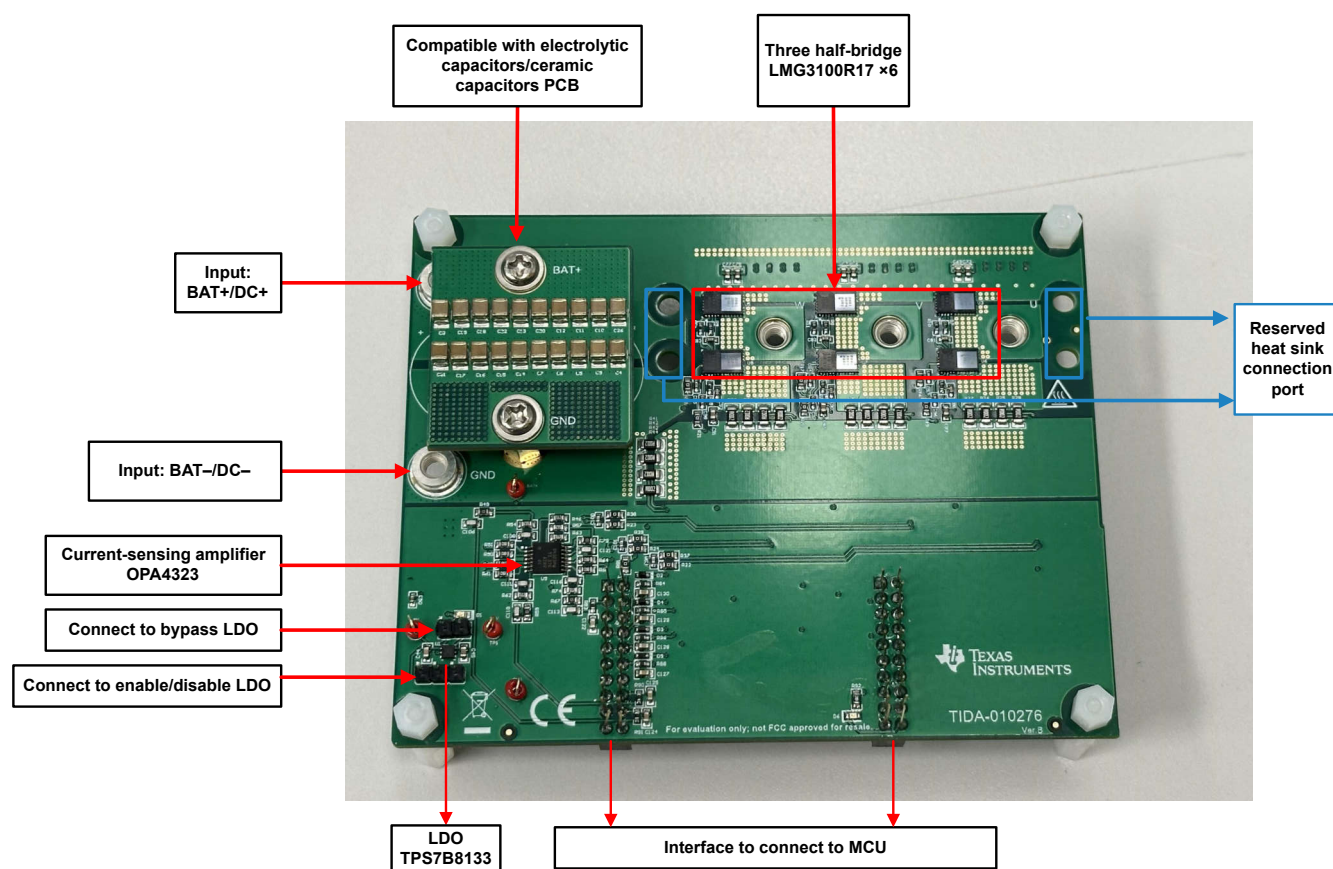


図 4-1. TIDA-010276 PCB の上面図

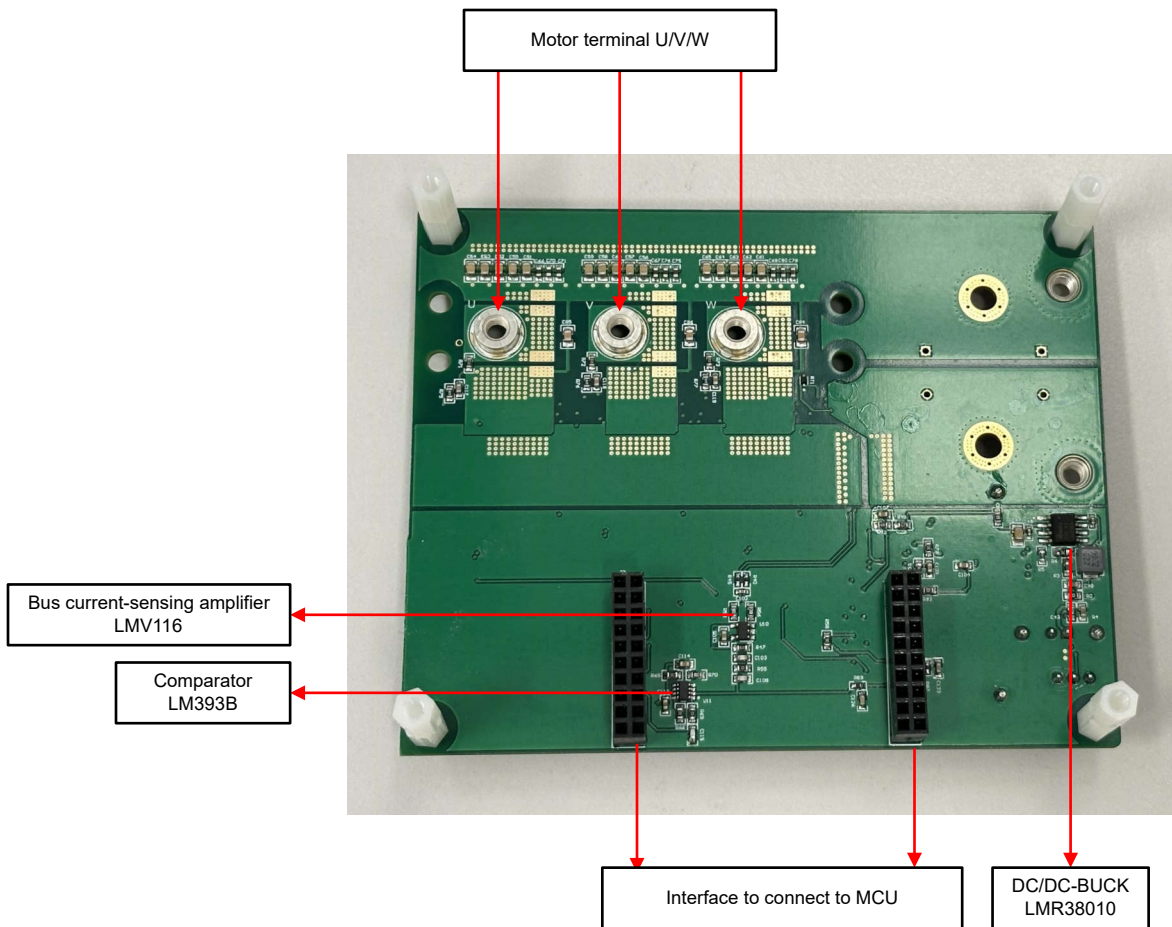


図 4-2. TIDA-010276 PCB の底面図

4.1.2 TIDA-010276 のジャンパ設定

表 4-1 に、4 つの TIDA-010276 ジャンパを示します。

表 4-1. TIDA-010276 のジャンパ設定

ジャンパ	機能	実装済み	未実装
J1	LDO 設定	バイパス LDO は出力を 5V に設定し	デフォルト
J2	LDO 設定	1 ～ 2 個のディスエーブル LDO を接続、 2 ～ 3 個のイネーブル LDO を接続	2 ～ 3 個のイネーブル LDO を接続
J1-J3、J2-J4	制御 接続	C2000 LaunchPad と接続	否定 制御信号
R82、R81	LaunchPad 用 3.3V または 5V	LaunchPad 電源	未実装 (デフォルト)、LaunchPad は独自の USB 電源を 使用

注意

R82 と R81 を同時に実装しないでください。R82 または R81 を実装するときは、C2000 LaunchPad に USB 経由で電力が供給されていないことを確認してください。この設定を行うには、F2800137 LaunchPad の電源ジャンパを取り外してください。

TIDA-010276 のインターフェイス仕様は、テキサス・インスツルメンツのブースタパック プラグイン モジュール規格に準拠しています。TIDA-010276 基板を C2000 LaunchPad ヘッダ J1～J4 に接続できます。図 4-3 に、F2800137

LaunchPad ヘッド J1～J4 に接続された TIDA-010276 を示します。TIDA-010276 は LaunchPad に電力供給しません。

DC 電源 (12V～48V、公称 36V) を DC 入力電圧コネクタ (MP1、MP3) に接続し、3 相モーターを 3 相出力電圧コネクタ (MP2、MP4、MP5) に接続します。3 相モーターが、PWM スイッチング中の位相電圧の高いスルー レートを処理できることを検証します。

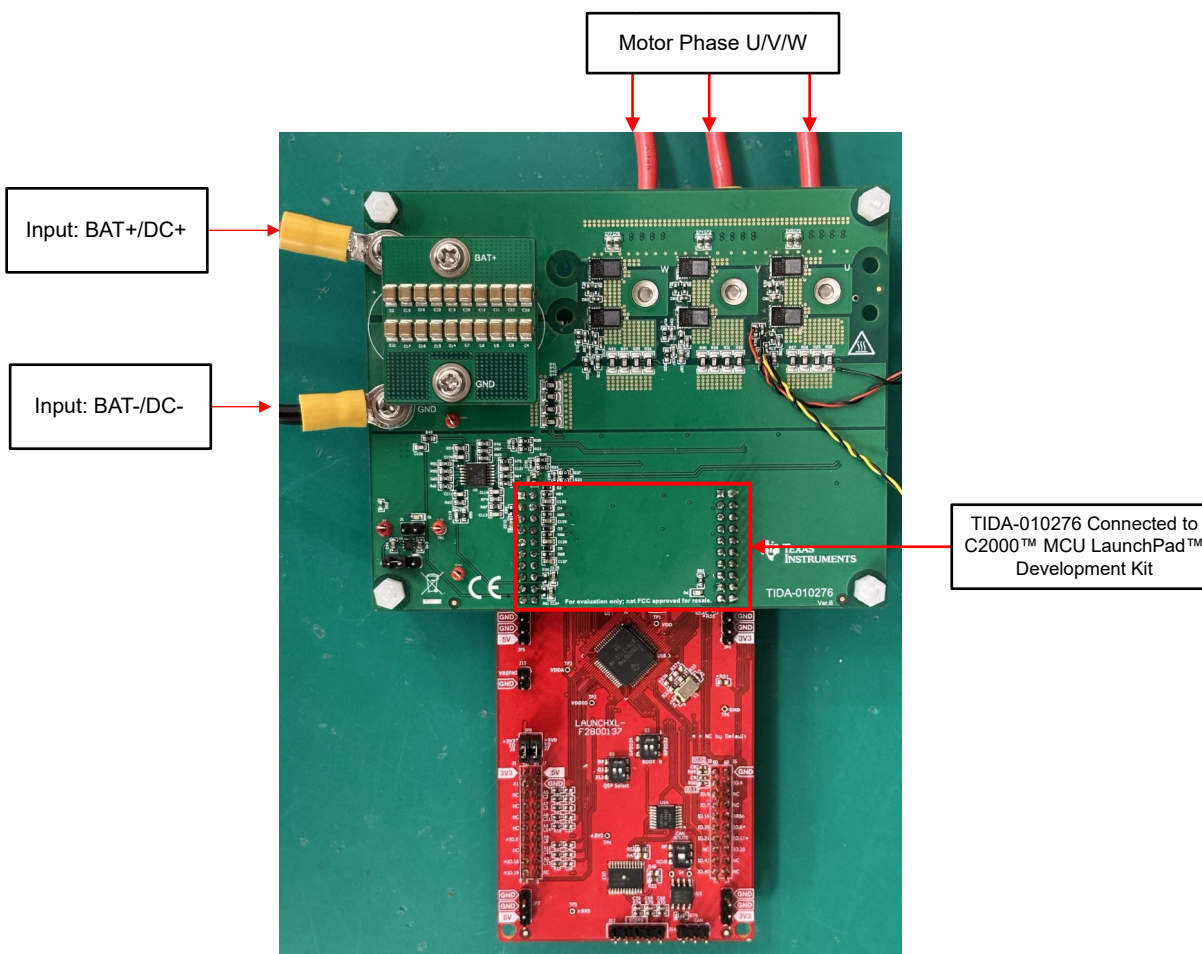


図 4-3. TIDA-010276 PCB と C2000 LaunchPad™ との接続

4.2 テスト設定

表 4-2 に、主な試験装置を示します。特定のテスト用のセットアップの説明と画像を、対応するテスト結果のセクションに示します。

表 4-2. 主な試験装置

説明	部品番号
高速オシロスコープ	Tektronix MSO4104B
シングルエンド プローブ	Tektronix P6139B
電力アナライザ	HIOKI PW6001
絶縁型電流プローブ	CYBERTEK CP8030H、HIOKI CT6872
ダイナモメーター	MAGTROL DSP6000
マルチメータ	Fluke 17B+
温度カメラ	FOTRIC
可変電源 (10A)	ITECH IT6724H
可変電源 (20A)	ITECH M3902C
C2000 MCU LaunchPad 開発キット	テキサス・インスツルメンツ LAUNCHXL-F2800137

- 基板からモーターの接続を取り外し、入力 DC 電源をオンにします。基板に最低 15V_{DC} 入力が入力され、3.3V が生成されていることを確認します。
- MCU の詳細をプログラムします
- プログラマを削除し、DC 入力電源をオフにします
- インバータ出力をモーター巻線端子に接続します
- バイパス LDO を無効化するには、J1 を接続解除します
- LDO を有効にするには、J2 (1~2 ピン) を接続します
- 電流制限保護機能を搭載した DC 電源を使用して、基板に 36V_{DC} を印加します。
- マイコンとデバッグツールを使用してモーターを動作させます

4.3 テスト結果

以下のセクションにテスト データを示します。テスト結果は複数のセクションに分かれており、BLDC モーターの定常状態の性能とデータ、機能性能の波形、過渡性能の波形を網羅しています。

4.3.1 パワー マネージメントおよびシステムのパワーアップとパワーダウン

このテストは、オンボードの 5V と 3.3V の電源を検証し、3.3V と 5V のレールの標準的な消費電流を測定することに重点を置いています。今回のテストでは、C2000 MCU LaunchPad 開発キットに TIDA-010276 から電力を供給しています。高い降圧比 36:5 (36V 入力から 5V 出力) のため、5V レールでの電圧リップルも検証されました。

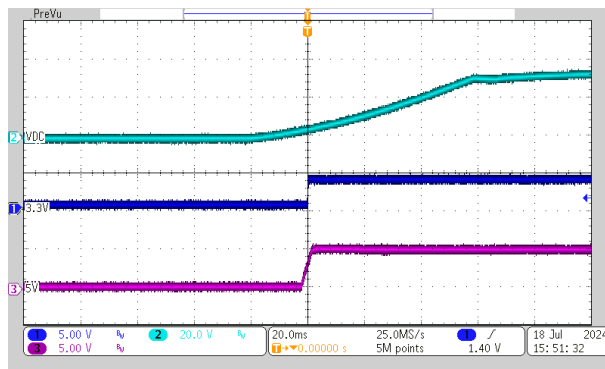


図 4-4. TIDA-010276 のパワーアップ

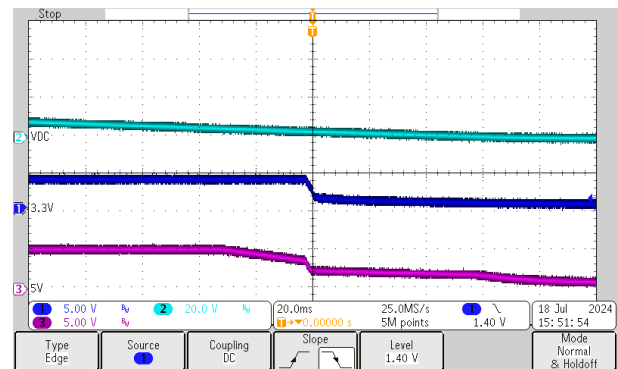


図 4-5. TIDA-010276 のパワーダウン

パワーダウン段では、バス電圧が約 5V まで低下すると、LMR38010 の出力がバス電圧とともに低下します。バスが 3.3V を下回ると、3.3V レールも低下し始めます。5V レールの AC リップルは、軽負荷時でも 10mV_{pp} を大きく下回っています。リップルの周波数は 574kHz で、これは降圧コンバータのスイッチング周波数と一致しています。5V レールのオフセットは約 5.03V です。

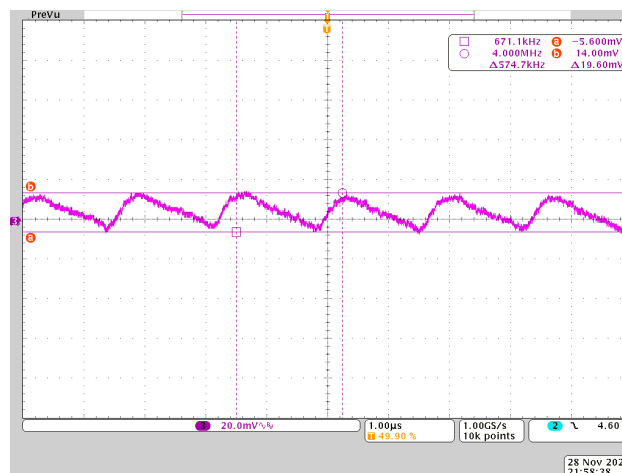


図 4-6. 公称負荷 (20mA) での TIDA-010276 の出力リップル

4.3.2 GaN インバータのスイッチ ノード電圧

このテストの焦点は、36V 時における GaN インバータのスイッチ ノード電圧の過渡応答を検証することでした。このテストのもう 1 つの目的は、LMG3100 GaN パワー モジュールの各ローカル バイパス コンデンサの容量や数量を検証することでした。C2000 マイコンは、16.6ns のデッド バンドの相補型 PWM を使って 3 相空間ベクトルを生成するように構成しました。位相ごとの PWM デューティ サイクルは、対応する位相電流 I_A を、 $I_B = I_C = -0.5 I_A$ の条件で駆動するように構成しました。図 4-7 に、PGND を基準とする LMG3100 SW ピンで測定されている LMG3100 スwitch ノード電圧を示します。

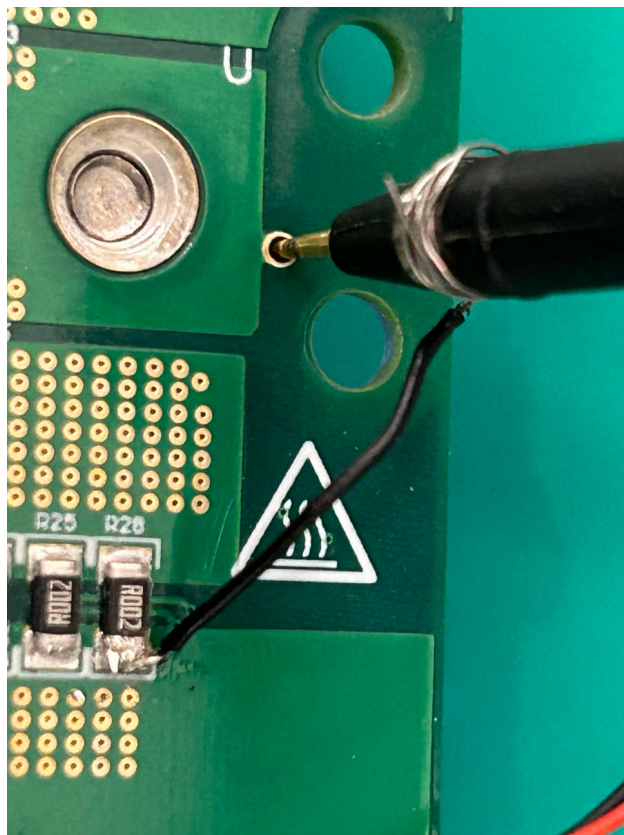


図 4-7. LMG3100 スwitch ノードのテスト設定

図 4-8 と 図 4-9 では、上下のブリッジ間で PWM 入力にデッド タイムがあることを示しています。テキサス・インスツルメンツは、50ns 超のデッド タイムを推奨します。

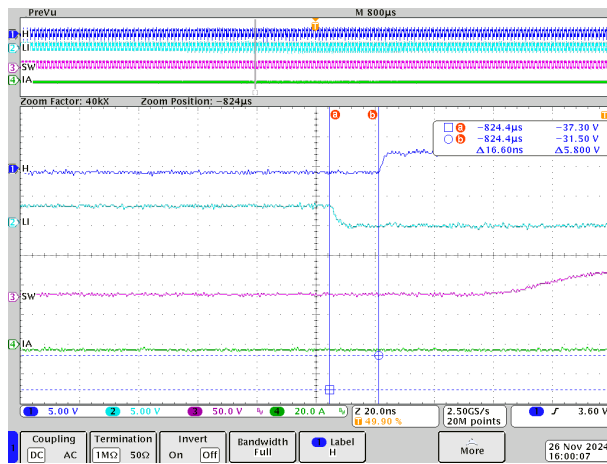


図 4-8. 立ち上がりエッジ PWM U (H および L)

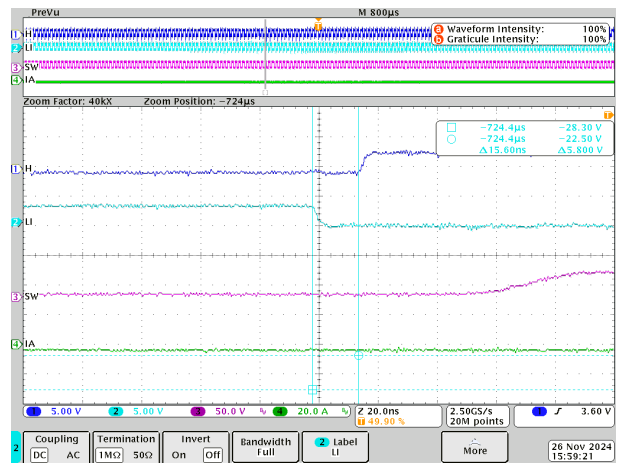


図 4-9. 立ち下がりエッジ PWM U (H および L)

4.3.3 スイッチ ノード電圧過渡応答

図 4-10 から 図 4-13 にかけて、ハード スイッチング時とソフト スイッチング時の SW 過渡電圧の概要を示します。PWM 周波数 (20kHz)、LMG3100 の伝搬遅延、および 16.6ns の PWM デッド バンドが確認できます。位相電流が小さいため、以下の波形に示すように、ハード スイッチングと、ソフト スイッチングとハード スイッチングの組み合わせが発生しています。GaN-FET のターンオンとターンオフのスルー レート (20%~80%) は、10V/ns~15V/ns 程度に構成されています。

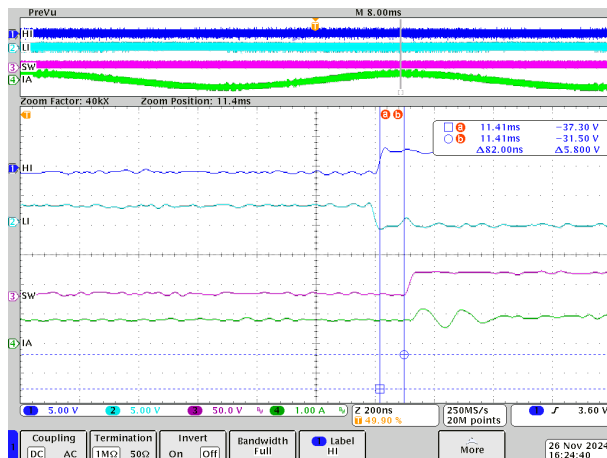


図 4-10. 位相 U の立ち上がり SW、位相電流 36V、1A

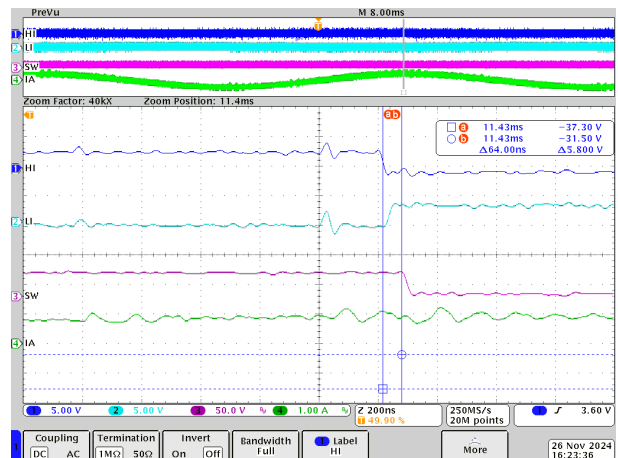


図 4-11. 位相 U の立ち下がり SW、位相電流 36V、1A

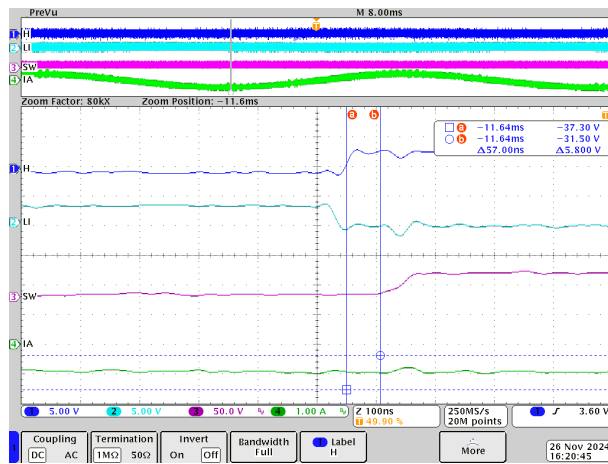


図 4-12. 位相 U の立ち上がり SW、位相電流 36V、-1A

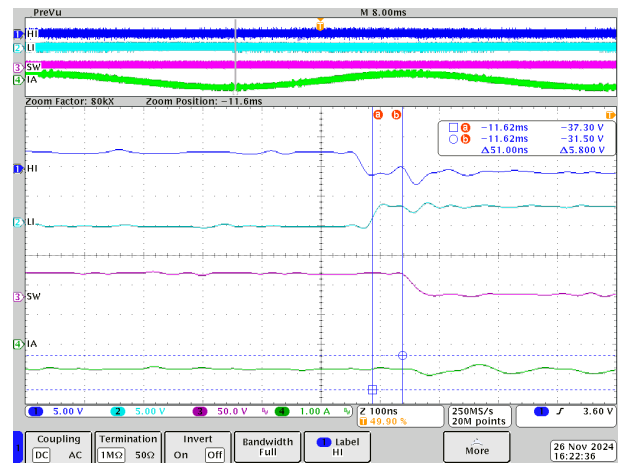


図 4-13. 位相 U の立ち下がり SW、位相電流 36V、-1A

図 4-14 から 図 4-17 にかけて、1A および 20A の出力でテストした PWM 入力から GaN-FET への伝搬遅延のテスト結果を示します。伝搬遅延はモーター制御システムに対して十分小さい値です。

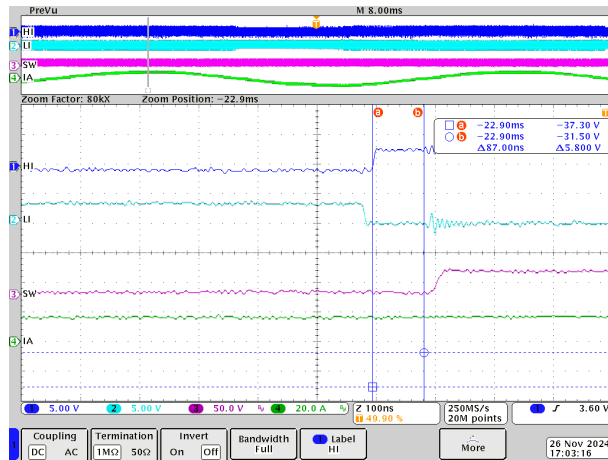


図 4-14. 位相 U の立ち上がり SW、位相電流 36V、20A

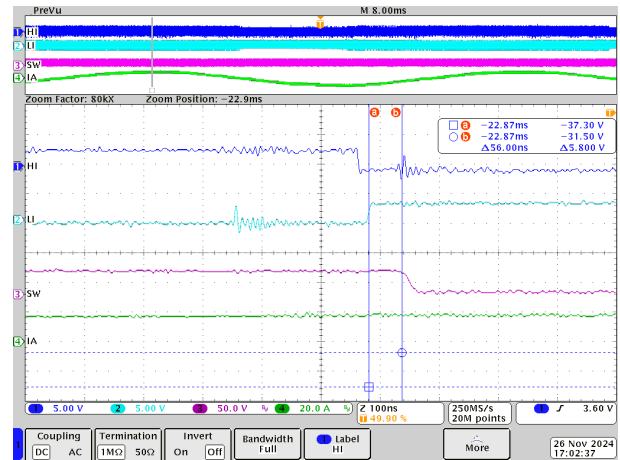


図 4-15. 位相 U の立ち下がり SW、位相電流 36V、20A

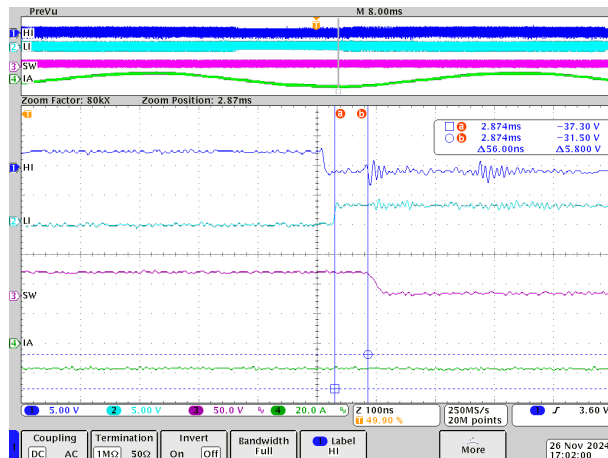


図 4-16. 位相 U の立ち上がり SW、位相電流 36V、-20A

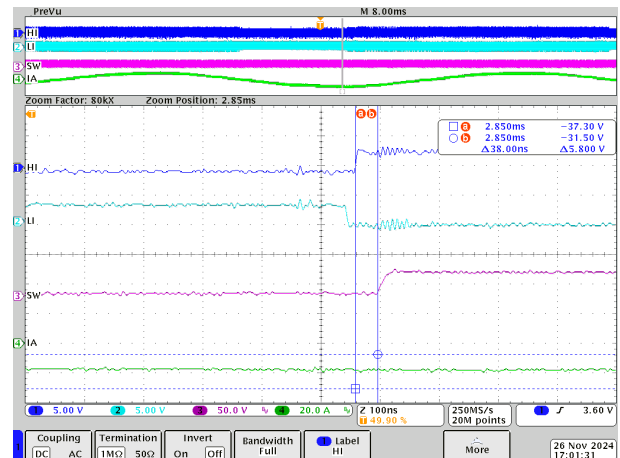


図 4-17. 位相 U の立ち下がり SW、位相電流 36V、-20A

4.3.4 PWM 周波数の DC バス電圧リップルへの影響

バスコンデンサの主な機能は、バス電圧を平滑化し、スイッチに遷移電流を供給してバス電圧リップルを小さく維持することです。これにより、FET 時間が短くなり、コンデンサに必要なコマンド量が小さくなります。そのため、PWM スイッチング周波数が高いほど、必要なバス容量値を小さくできます。通常、バスコンデンサは電解コンデンサとして配置されます。以下のテストでは、電解コンデンサからセラミックコンデンサへの置き換えを試み、異なる周波数で PWM リップル電解コンデンサとセラミックコンデンサの周波数を上げています。

以下のテストは、動作する 400 μ F セラミックコンデンサと 1000 μ F 電解コンデンサのデータを比較したものです。

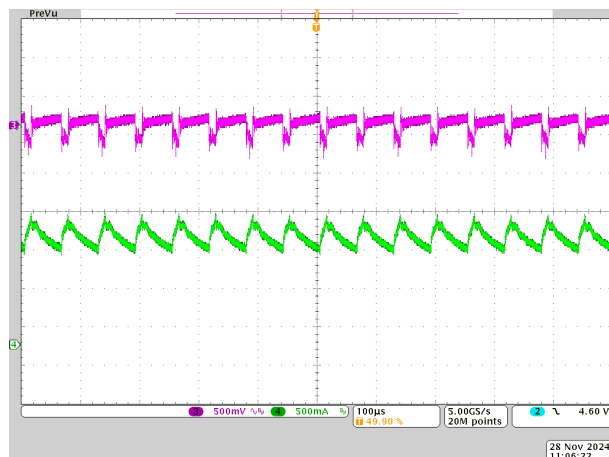


図 4-18. 8kHz PWM、10A での電解コンデンサのリップル電流およびリップル電圧



図 4-19. 80kHz PWM、10A での電解コンデンサのリップル電流およびリップル電圧



図 4-20. 8kHz PWM、10A でのセラミックコンデンサのリップル電流およびリップル電圧

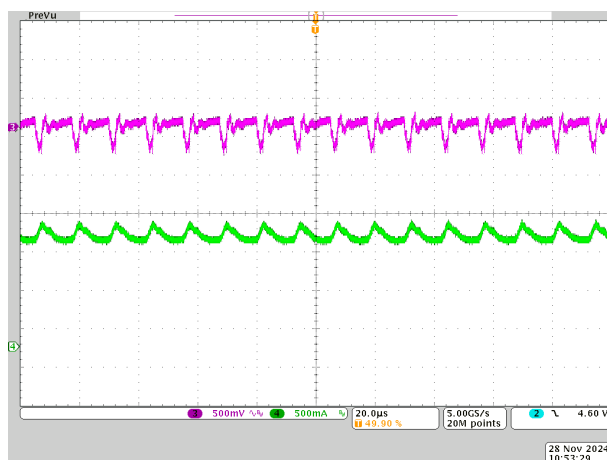


図 4-21. 80kHz PWM、10A でのセラミックコンデンサのリップル電流およびリップル電圧

結果に示されるように、周波数が高くなるにつれてバスのリップルが徐減少するため、より小さな容量のコンデンサを使用できます。ただし、セラミックコンデンサは、低周波数では電圧リップルが著しく大きくなります。この $10\mu\text{F}$ セラミックコンデンサの実際の容量は 36V の電圧でわずか $4\mu\text{F}$ であるため (GRM32EC72A106KE05 データシートより)、 $400\mu\text{F}$ セラミックコンデンサに対応する実際の実効容量は $160\mu\text{F}$ です。PWM 周波数が 80kHz に上昇すると、 $400\mu\text{F}$ セラミックコンデンサ (実効容量 $160\mu\text{F}$) と $1000\mu\text{F}$ 電解コンデンサの電圧リップルはほぼ同じになります。したがって、GaN の非常に低いスイッチング損失を利用して、PWM 周波数を 80kHz に上げることができます。同時に、電解コンデンサを同じ容量のセラミックコンデンサに置き換えることで、小型化も実現できます。

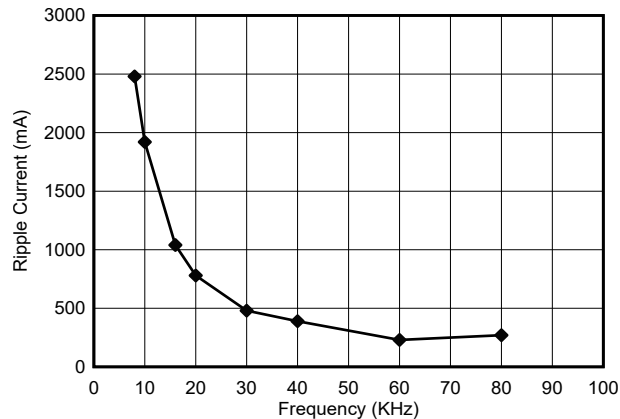


図 4-22. 8kHz から 10kHz までにおけるセラミックコンデンサのリップル電流の変化

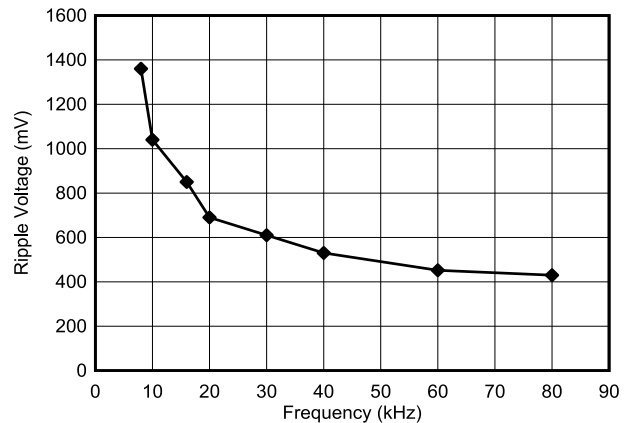


図 4-23. 8kHz から 10kHz までにおけるセラミックコンデンサのリップル電圧の変化

4.3.5 効率の測定

効率テストは、HIOKI® PW6001 電力アナライザと HIOKI® CT6872 電流トランスを使用して、27°C のラボ温度で実施しました。PWM キャリア周波数は 20kHz~80kHz に設定しました。電圧は 36V、モーター速度は 600rpm です。モーターは電流モードで動作し、電力損失をテストします。図 4-24 にテスト設定の写真を示します。これらのテストではすべて、ヒートシンクもファンも使用していないため、TIDA-010276 PCB の自然対流のみが適用されました。

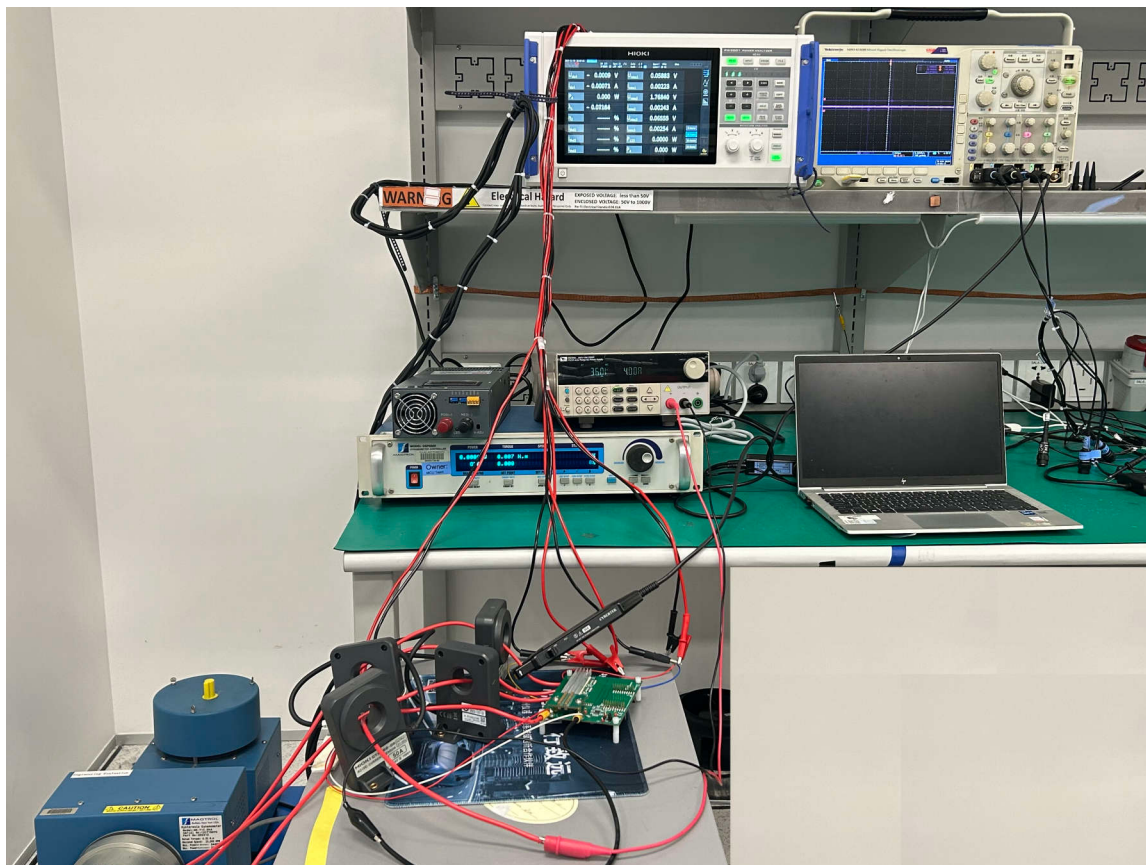


図 4-24. インバータの効率分析のテスト設定

図 4-25 は、TIDA-010276 の電力損失と 3 相モーター負荷電流との関係を A_{RMS} で示したものです。これらの数値には、C2000 MCU LaunchPad 開発キットの電力損失は含まれていません。

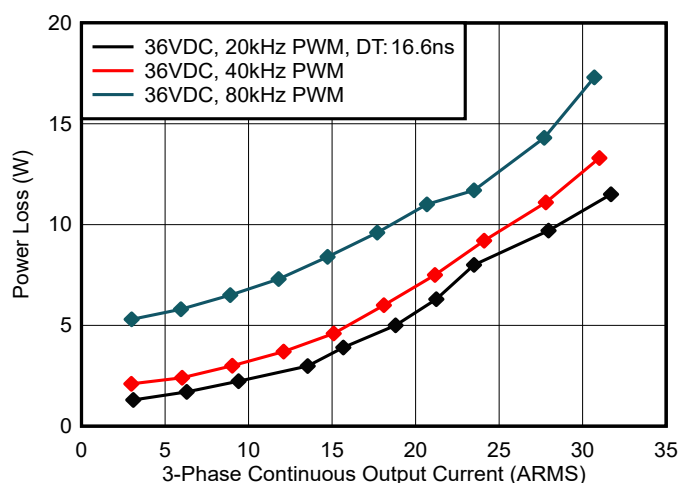


図 4-25. TIDA-010276 36V 入力での基板損失と 3 相出力電流との関係

TIDA-010276 の電力損失は、主に GaN FET (LMG3100) の損失と、 $0.5\text{m}\Omega$ バス電流シャント抵抗と 3 つの $0.5\text{m}\Omega$ ロード側 FET シャント抵抗の損失に左右されます。図 4-26 に示す計算結果によると、最大相間電圧 $14.69\text{V}_{\text{RMS}}$ (3 次高調波による空間ベクトル PWM)、力率 0.9 での 36VDC における最大ピーク効率の理論値は、20kHz PWM で 99.16%、40kHz PWM で 99.01%、80kHz で 98.58% です。

PWM スwitchング周波数が高くなっても、基板の電力損失は大幅に増加していないことに注目してください。このことは、LMG3100R17 GaN FET のスイッチング損失が非常に小さいことも反映しており、PWM スwitchング周波数が高くても非常に高い効率を達成できます。

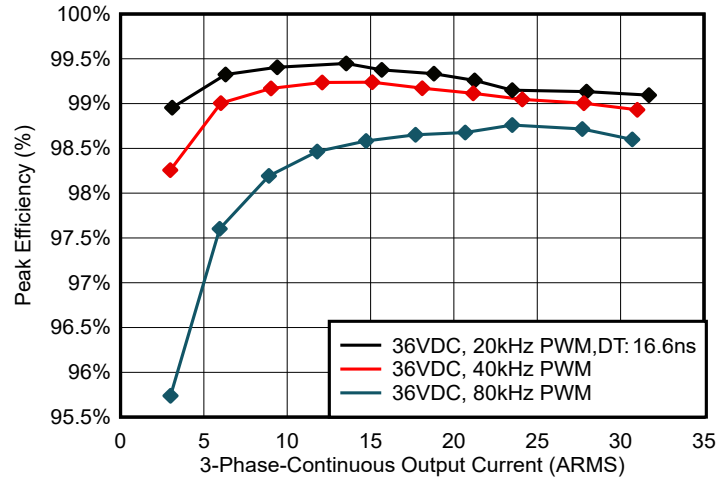


図 4-26. 36VDC、40kHz、60kHz、80kHz PWM 時の最大ピーク効率の計算値

TIDA-010276 設計と電動自転車モーターを使用して、システムのテストを行いました。テストの結果、スイッチング周波数を高くすると、モーター駆動の全体的な効率も向上することが判明しました。表 4-3 に、TIDA-010276 のモーター システムの効率テスト結果を示します。

表 4-3. TIDA-010276 のモーター システムの効率テスト結果

パラメータ	20kHz (デッドタイム = $1\mu\text{s}$)	80kHz (デッドタイム = 16.6ns)
P_{IN}	49.8 W	48.2W
P_{OUT} (インバータ)	49.2 W	47.5W
η (インバータ)	98.70%	98.50%
速度	480rpm	480rpm
トルク	0.68Nm	0.68Nm
P_{mech}	34.178 W	34.178W
η (モーター)	68.63%	70.90%
η (合計)	67.7%	69.9%

4.3.6 熱解析

この設計の熱解析は、大電力モーターを駆動し、 $36V_{DC}$ 入力、20kHz、40kHz、および 80kHz で、 $27^{\circ}C$ のラボ温度で実施しています。モーターを約 10 分間動作させてから、温度をキャプチャします。このテストはヒートシンクなしで実行し、外部ファンは一定の距離で空気を供給します。

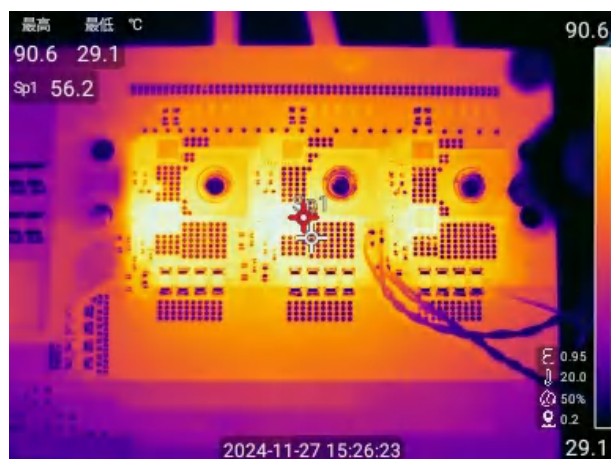


図 4-27. 50A ピーク、20kHz PWM での TIDA-010276 の熱画像

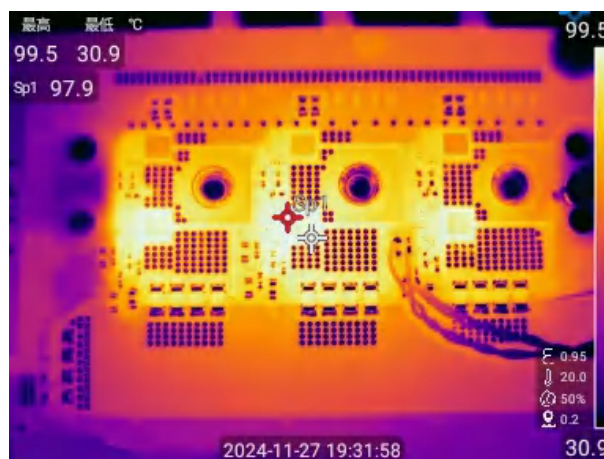


図 4-28. 50A ピーク、40kHz PWM での TIDA-010276 の熱画像

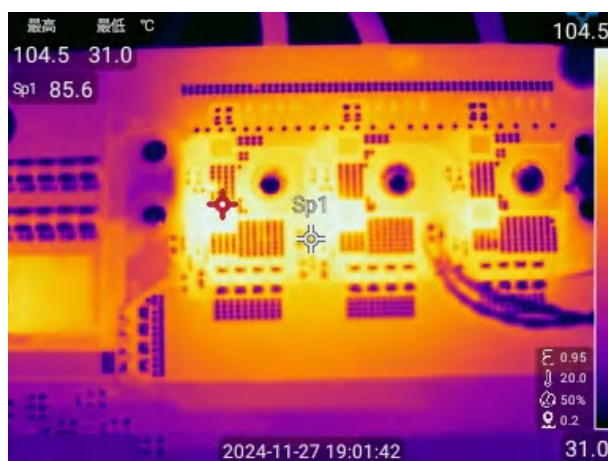


図 4-29. 50A ピーク、80kHz PWM での TIDA-010276 の熱画像

LMG3100 は上面でダイが露出しているため、ケース温度はダイの温度に非常に近くなります。最大接合部温度は $175^{\circ}C$ までです。このテストでは、まだ接合部温度にマージンがあります。

TIDA-010276 のテストには小型のヒートシンクを使用します。モーターを、80kHz、50A ピーク (27°C ラボ温度) で動作させます。図 4-30 に小型のヒートシンクを使用した設計を示し、図 4-31 に結果として得られる熱画像を示します。TIDA-010276 を使用してより大きな電力で動作させる場合は、熱要件を満たすために、より大きなヒートシンクを選択します。

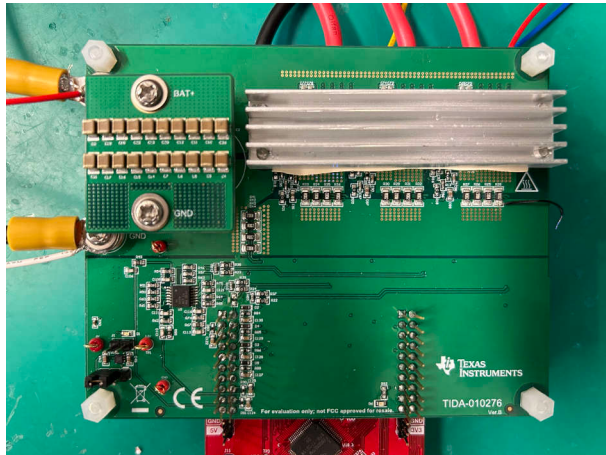


図 4-30. 小型ヒートシンクを使用した TIDA-010276

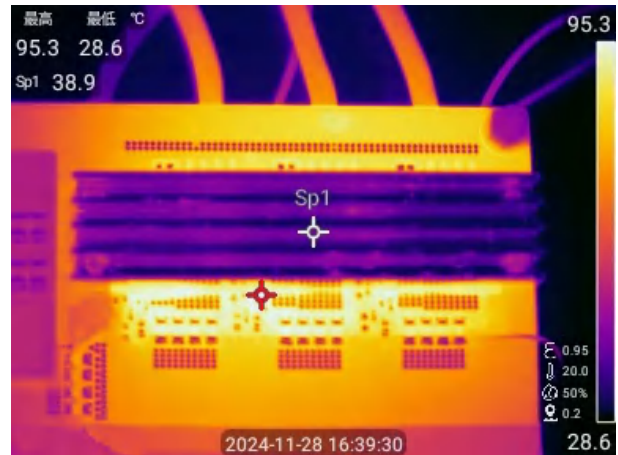


図 4-31. 50A ピーク、80kHz PWM での TIDA-010276 の熱画像

5 設計とドキュメントのサポート

5.1 デザイン ファイル

5.1.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDA-010276](#) 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、[TIDA-010276](#) 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

CCSTUDIO

Code Composer Studio は、テキサス・インスツルメンツのマイクロコントローラおよびプロセッサ向けの統合開発環境 (IDE) です。IDE は、組込みアプリケーションの開発およびデバッグに必要な一連のツールで構成されています。Code Composer Studio は、Microsoft® Windows®, Linux®, macOS® のデスクトップからダウンロードできます。また、TI デベロッパー ゾーンにアクセスし、クラウド環境で実行することもできます。

TMS320F2800137 C2000™ リアルタイム マイコン向け LaunchPad™ 開発キット

LAUNCHXL-F2800137 は、TI の C2000™ リアルタイム マイコンである F280013x デバイスファミリ向けの開発ボードです。このキットは初期評価やプロトタイプ製作に最適であり、新しいアプリケーションを開発するための標準化された使いやすいプラットフォームを実現できます。LaunchPad™ 開発キットの拡張バージョンであり、開発用のピンが追加され、2 個の BoosterPack™ プラグイン モジュールの接続をサポートします。テキサス・インスツルメンツの多様なマイコン LaunchPad エコシステムの一部であるこのツールには、幅広いプラグイン モジュールとの相互互換性があります。

ソフトウェア

C2000™ マイコン向けモーター制御ソフトウェア開発キット (SDK)

C2000™ マイコン (MCU) 向けモーター制御 SDK は、さまざまな 3 相モーター制御アプリケーションを対象とした 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時間を最小限に抑える目的で設計された、ソフトウェア インフラ、ツール、ドキュメントの一式です。このソフトウェアには、C2000 モーター制御評価モジュール (EVM) で動作するファームウェアと、産業用ドライブ、ロボット、家電製品、車載アプリケーションを対象としたテキサス・インスツルメンツのリファレンス デザインが含まれています。MotorControl SDK は、高性能モーター制御アプリケーションの開発と評価のすべての段階で必要とされるあらゆるリソースを提供します。

5.3 ドキュメントのサポート

1. テキサス インスツルメンツ、『LMG3100R017 ドライバ内蔵、100V、97A GaN FET』データシート
2. テキサス インスツルメンツ、『LMR38010 40µA I_Q、4.2V~80V、1A、SIMPLE SWITCHER® 同期整流降圧パワーコンバータ』データシート
3. テキサス インスツルメンツ、『TPS7B81 150mA、40V、超低 I_Q、低ドロップアウトレギュレータ』データシート
4. テキサス インスツルメンツ、『TMP61 0402 および 0603 パッケージ オプション付き ±1% 10kΩ リニア サーミスタ』データシート
5. テキサス インスツルメンツ、『OPAx323 20MHz 高帯域幅、114dB 同相信号除去比、低電圧 (1.7V~5.5V)、RRIO ゼロ クロス オペアンプ』データシート

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、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

BoosterPack™, C2000™, LaunchPad™, テキサス・インスツルメンツの™, InstaSPIN-FOC™, PowerPAD™, and テキサス・インスツルメンツ E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

HIOKI® is a registered trademark of Hioki E.E. Corporation.

Microsoft® and Windows® are registered trademarks of Microsoft Corporation.

Linux® is a registered trademark of Linus Torvalds.

macOS® is a registered trademark of Apple Inc.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

6 著者について

ジェンソン ファング テキサス・インスツルメンツのシステム エンジニア。モーター制御や BMS 設計の主などに関する家電製品のシステム開発責任者。

7 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 * (January 2025) to Revision A (June 2025)	Page
• TIDA-010276 による電流センシングの画像を更新。.....	9
• テキストを明確にするために表現を追加。.....	9
• TIDA-010276 の位相電圧および DC 入力電圧のセンシングの画像を更新。.....	10
• デッド タイムの推奨値を 16.6n から 50ns 超に変更。.....	16

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](https://www.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](https://www.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