

# Design Guide: TIDA-010250

## 1kW BLDC モーター インバータのリファレンス デザイン



### 概要

このリファレンス デザインは、Arm® Cortex®-M0+ コア採用のマイクロコントローラである MSPM0G1507 を使用したモーター インバータを提示します。このデザインは、1~3 個のシャント抵抗を使用するセンサレス フィールド オリエンテッド コントロール (FOC:磁界方向制御) アルゴリズムに加え、ホール効果センサまたは QEI (直交エンコーダ インターフェイス) センサを使用するセンサ付きモーター 駆動アルゴリズムもサポートしています。このリファレンス デザインで利用できるハードウェアとソフトウェアはテスト済みであり、すぐに使用できるので、開発期間短縮に貢献します。

### リソース


<a href="#">TIDA-010250</a>	デザイン フォルダ
<a href="#">MSPM0G1507</a>	プロダクト フォルダ
<a href="#">UCC28881</a>	プロダクト フォルダ
<a href="#">UCC27712</a>	プロダクト フォルダ
<a href="#">TLV9064</a>	プロダクト フォルダ
<a href="#">TPS54202</a>	プロダクト フォルダ
<a href="#">ISO6721</a>	プロダクト フォルダ

### 特長

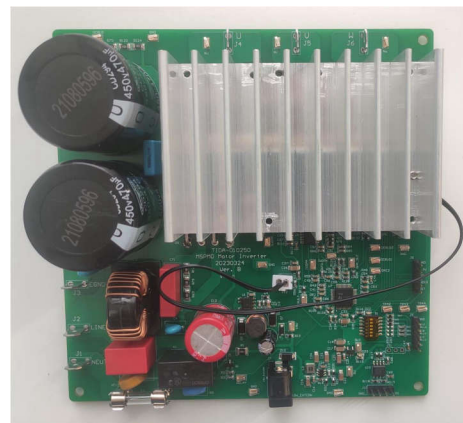
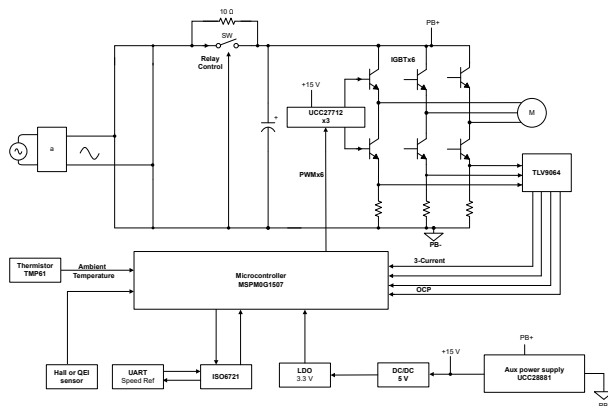
- 1、2、または 3 個のシャント抵抗を使用するセンサレス FOC アルゴリズム モーター制御
- ホール効果または QEI を使用するセンサ付きモーター制御
- 最大 1kW のインバータ段
- 過電流保護と過電圧保護を備えた堅牢な設計

### アプリケーション

- [冷蔵庫と冷凍庫](#)
- [洗濯機 / 乾燥機](#)
- [ミキサー、ブレンダー、フード プロセッサ](#)
- [換気扇フード](#)
- [エアコン室内機](#)



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



## 1 システムの説明

現在の主要な家電アプリケーション向けモーター制御は、低コスト、小型化、大電力、高エネルギー効率に対する需要の増大に対応する必要があります。ブラシレス直流 (BLDC) モーターと永久磁石同期モーター (PMSM) は、主要な家電アプリケーションでますます一般的になっています。高速 Arm Cortex-M0+ コアと豊富なアナログ ペリフェラルの活用により、MSPM0G1507 マイクロコントローラはセンサ付きまたはセンサレス モーター制御用の真のシングル チップ ソリューションを実現し、部品表の部品点数の削減とコスト効率の優れた小型モーター インバータの設計に役立ちます。

### 1.1 主なシステム仕様

パラメータ	テスト条件	最小値	公称値	最大値	単位
入力電圧		165	230	265	VAC
入力周波数		47	50	63	Hz
PWM スイッチング周波数 ( $f_{sw}$ )			8		kHz
定格電力出力 ( $P_{OUT}$ )			1		kW
出力電流 ( $I_{RMS}$ )			3		A
インバータの効率			97		%
モーターの電気周波数		30	100	200	Hz
フォルト保護	過電流、過電圧、過熱、低電圧				
駆動制御方法	ホール効果または QEI を使用するセンサ付きモーター制御と、1、2、または 3 個のシャント抵抗を使用するセンサレス モーター制御				
動作時周囲温度	オープンフレーム	-10	25	55	°C
内蔵補助電源	$V_{INAC}$ = 最小値～最大値	15V $\pm$ 10%、200mA			
ボード サイズ	140mm $\times$ 140mm $\times$ 40mm				

#### 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関連する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。

**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、また動作直後も高温の状態が続く可能性があるため、基板に触れてはいけません。

#### 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 に、リファレンス デザインのブロック図を示します。

システム全体は、以下のブロックで表現されます。

- 補助電源
- MCU コントローラ
- 3 相インバータ
- シャント抵抗を使用した相電流センシング
- ホール効果または QEI インターフェイス
- 絶縁型ユニバーサル同期 / 非同期レシーバ / トランスミッタ (USART) シリアル通信

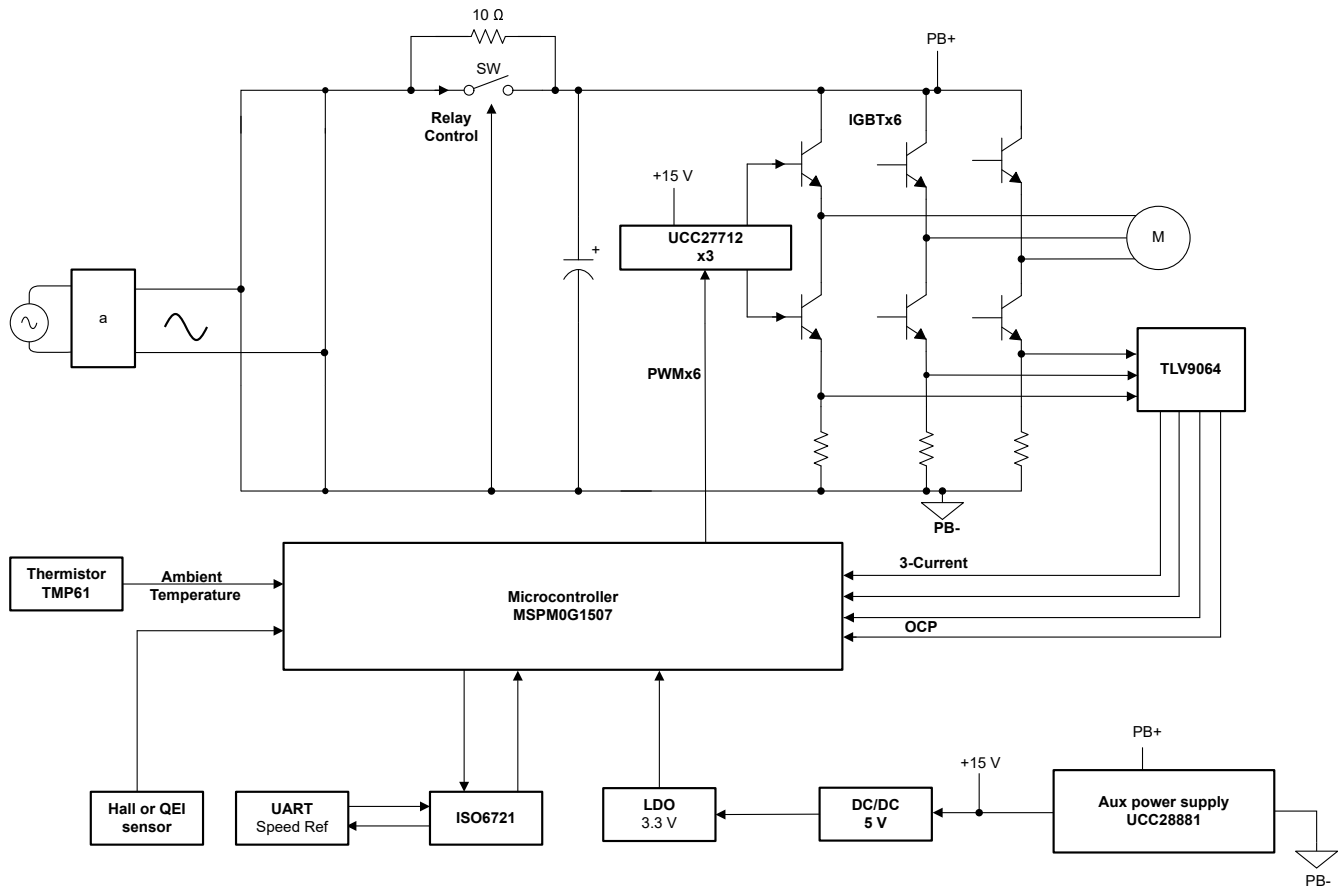


図 2-1. リファレンス デザインのブロック図

## 2.2 設計上の考慮事項

このシステムは、電解コンデンサを使用したダイオードブリッジから開始し、安定した DC バスを形成します。UCC2881 をベースとするシンプルな高電圧降圧電源により、ゲートドライバ UCC27712 に非絶縁型 15V を供給し、絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) を駆動します。

TPS54202 DC/DC コントローラは 15V から 5V の降圧を行い、TLV74033 は低リップルの 3.3V を供給してマイクロコントローラに電力を供給するとともに、A/D コンバータ (ADC) のリファレンス電圧として機能します。

MSPM0G1507 マイクロコントローラは、IGBT がモーターへの電流フローを制御するためのゲートドライバに 6 つの PWM を提供します。また、このデバイスは DC バス電圧、周囲温度、ホール効果または QEI 信号、相電流も検出し、モーター制御アルゴリズムを実装します。

## 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。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を以下のセクションに示します。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。

### 2.3.1 MSPM0G1507

MSPM0G1507 マイクロコントローラ (MCU) は、最大 80MHz の周波数で動作する拡張 Arm® Cortex®-M0+ 32 ビット コア プラットフォームに基づくミックスド シグナル処理 (MSP) の高集積超低消費電力 32 ビット MCU ファミリの一部です。コスト最適化されたこれらの MCU は高性能アナログ ペリフェラルを統合しており、-40°C~105°C の拡張温度範囲をサポートし、1.62V~3.6V の電源電圧で動作します。MSPM0G1507 デバイスは、誤り訂正符号 (ECC) 付きの最大 128KB 組み込みフラッシュ プログラム メモリ、およびハードウェア パリティ オプション付きの最大 32KB SRAM を搭載しています。また、メモリ保護ユニット、7 チャンネル DMA、演算アクセラレータ、各種の高性能アナログ ペリフェラル (2 つの 12 ビット 4MSPS ADC、設定可能な内部共有リファレンス電圧、1 つの 12 ビット 1MSPS DAC、リファレンス電圧 D/A コンバータ (DAC) 内蔵の 3 つの高速コンパレータ、ゲインをプログラム可能な 2 つのゼロドリフト ゼロクロスオーバー オペアンプ、1 つの汎用アンプなど) も内蔵しています。これらのデバイスは、3 つの 16 ビット高度制御タイマ、3 つの 16 ビット汎用タイマ、1 つの 24 ビット高分解能タイマ、2 つのウィンドウ付きウォッチドッグ タイマ、1 つのアラームおよびカレンダーモード付き RTC などのインテリジェントなデジタル ペリフェラルも備えています。これらのデバイスは、データの整合性と暗号化のペリフェラル、および豊富な通信インターフェイス (4 つの UART、2 つの I2C、2 つのシリアル ペリフェラル インターフェイス (SPI)) を提供します。

### 2.3.2 UCC28881

UCC28881 は、コントローラと 14Ω、700V のパワー MOSFET を 1 つのモノリシック デバイスに統合したものです。また、このデバイスには高電圧電流源も内蔵されており、整流電源電圧からの直接の起動と動作が可能です。UCC28881 は、より電流が大きい UCC28880 と同じファミリ デバイスです。

デバイスの静止電流が小さいため、優れた効率が得られます。UCC28881 を使用すると、降圧、昇降圧、フライバックなどの最も一般的なコンバータトポロジを、最小限の外付け部品数で構築できます。

### 2.3.3 UCC27712

UCC27712 は 620V のハイサイドおよびローサイド ゲートドライバで、ソース 1.8A、シンク 2.8A の電流能力を持ち、パワー MOSFET や IGBT を駆動するよう設計されています。推奨 VDD 動作電圧は、IGBT では 10V~20V、パワー MOSFET では 10V~17V です。UCC27712 には保護機能が組み込まれており、入力がオープンの状態、または最小入力パルス幅の仕様が満たされていない場合、出力は LOW に保持されます。インターロックおよびデッド タイム機能により、両方の出力が同時にオンになることが防止されます。

### 2.3.4 TLV9064

TLV9064 は、レール ツー レールの入力および出力スイング機能を備えたクワッド低電圧 (1.8V~5.5V) オペアンプです。これらのデバイスは、低電圧での動作、小さな占有面積、大きな容量性負荷の駆動が必要なアプリケーション向けの、コスト効率の優れた設計です。TLV906x の容量性負荷駆動能力は 100pF ですが、開ループ出力インピーダンスは抵抗性なので、大きい容量性の負荷でも簡単に安定できます。TLV906xS デバイスはシャットダウン モードを備えており、アンプをスタンバイ モードに切り替えて標準消費電流 1μA 未満とすることができます。TLV906xS ファミリはユニティ

ゲイン安定で、RFI および EMI 除去フィルタが内蔵され、オーバードライブ状況で位相反転が発生しないため、システムの設計を簡素化するため役立ちます。

### 2.3.5 TPS54202

TPS54202 は、入力電圧範囲 4.5~28V、2A の同期整流降圧コンバータです。このデバイスには 2 つの内蔵スイッチング FET、内部的なループ補償、および 5ms の内部ソフトスタートが搭載されているため、部品数を減らすことができます。

高度な Eco-mode の実装により、軽負荷時の効率が最大化され、電力損失が低減されています。

両方のハイサイド MOSFET でサイクル単位の電流制限を行い、過負荷の状況でコンバータを保護します。また、ローサイド MOSFET の電流制限を自由に設定でき、電流暴走を防止することで、さらに保護が強化されています。

## 3 システム設計理論

このリファレンス デザインの中核は、家電アプリケーション向けにセンサ付きとセンサレスの両方の FOC アルゴリズムをサポートする MSPM0G1507 マイクロコントローラを搭載したモーター制御システムです。

### 3.1 高電圧降圧補助電源

簡素化された UCC28881 ベースの高電圧降圧電源により、このリファレンス デザインで補助電源が確保され、15VDC で最大 200mA が供給されます。

図 3-1 に、UCC28881 高電圧降圧電源回路を示します。

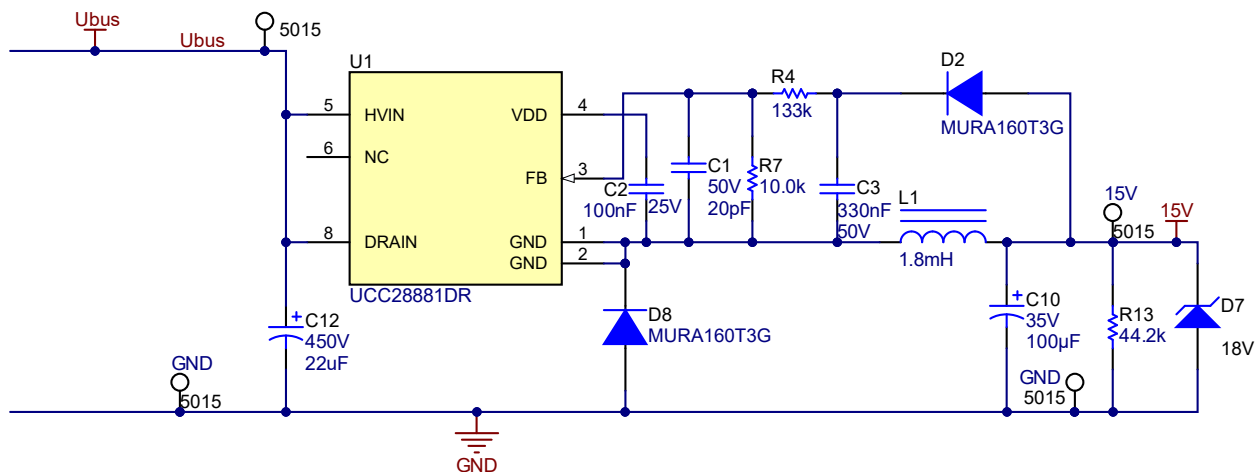


図 3-1. UCC28881 高電圧降圧電源回路

### 3.2 DC バス電圧センシング

DC 電圧検出回路は、図 3-2 に示すように、整流電圧信号を低電圧信号、つまり低コストの分圧抵抗回路に変換するために使用されます。DC バス電圧を使用して、AC 入力電圧を推定することもできます。

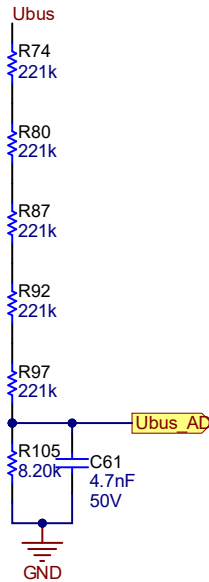


図 3-2. DC バス検出回路

### 3.3 モータードライブ段

3 相モーター インバータは、6 つの 10A IGBT を使用して実現されています。図 3-3 に、1 つのハーフブリッジ IGBT とドライブ回路を示します。IGBT ゲート抵抗を変更して IGBT の立ち上がり時間または立ち下がり時間を制御し、電力損失と EMI ノイズ レベルの間でトレードオフを行うことができます。

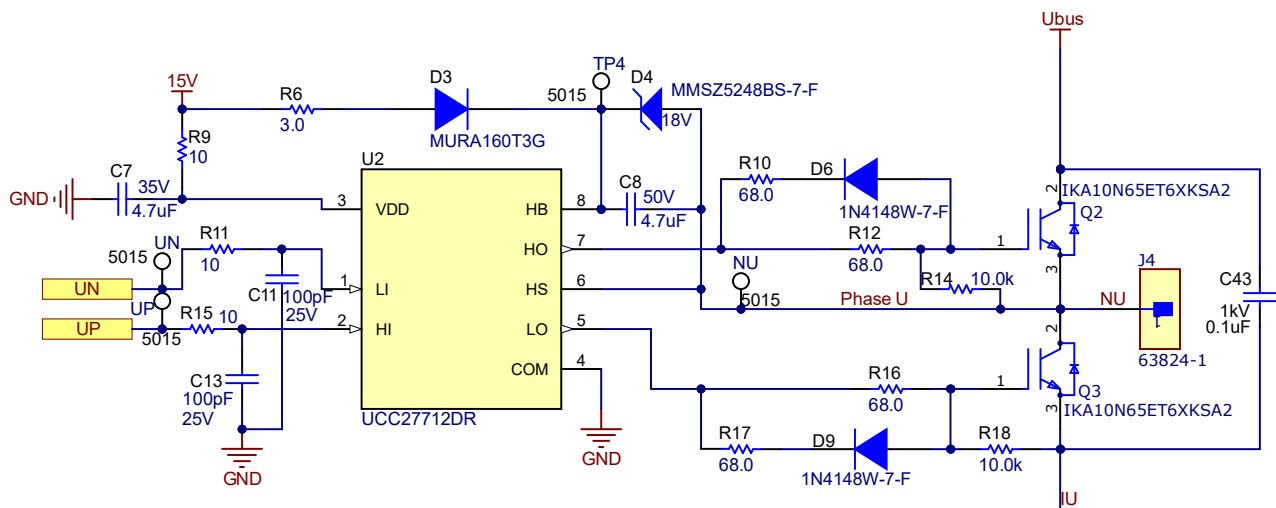


図 3-3. ハーフブリッジ IGBT とゲートドライバ

### 3.4 バイパス コンデンサ

各ハーフブリッジには高電圧 (1kV) のセラミック バイパス コンデンサ (回路図では C43、C48、C62) があり、ハーフブリッジごとに 0.1μF の容量を提供します (図 3-3 を参照)。これらのバイパス コンデンサは、スイッチング中に各ハーフブリ

ッジで高周波電流を処理します。この電流は、電解 DC バルク コンデンサでは対応できません。これらの X7R コンデンサは、EMI ノイズレベルの低減にも役立ちます。

### 3.5 2 個または 3 個のシャント抵抗を使用した相電流センシング

このリファレンス デザインは、1、2、または 3 個のシャント抵抗をサポートしています。このリファレンス デザインでは、外部の TLV9064 によって 3 相電流が検出されますが、MSPM0G1507 マイクロコントローラには 2 つのゼロドリフト ゼロクロスオーバー オペアンプが内蔵されています。これらのオペアンプは最大 2 相の電流サンプリングをサポートしているため、外部オペアンプは不要で、システムのコストを削減できます。図 3-4 に、シャント抵抗の構成を示します。

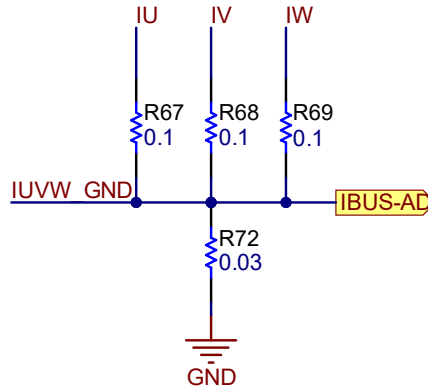


図 3-4. シャント抵抗の構成

### 3.6 単一のシャント抵抗を使用した相電流センシング

このリファレンス デザインは、オペアンプを内蔵した単相電流センシングもサポートしています。図 3-4 の R72 は単相電流センシング用のシャント抵抗であり、このような用途では R67、R68、R69 を短絡できます。単相電流センシングをサポートするために、内部オペアンプ OPA0 を選択します。図 3-5 は、内部 OPA0、ゲイン、帯域幅の回路を抵抗とコンデンサで設定できることを示しています。デフォルトのゲインは 2 です。

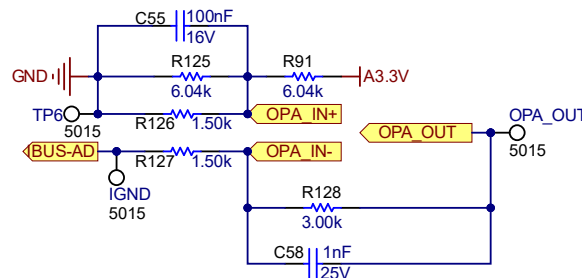


図 3-5. 内部オペアンプ OPA0 の回路

### 3.7 センサ付きモーター制御用のホール効果センサまたは QEI インターフェイス

このリファレンス デザインは、ホールまたは直交エンコーダ インターフェイス (QEI) モード ベースのセンサ付きモーター制御アルゴリズムもサポートしています。MSPM0G1507 には、2 または 3 信号の QEI をサポートする TIMG タイマが搭載されています。QEI モードで構成すると、TIMG は、直線運動または回転運動の相対的な位置決めと移動量に関する情報を提供するために直交エンコード信号を収集できます。

QEI は、2 つのグレイコード化された直交入力信号 PHA と PHB、およびインデックス入力信号 IDX で構成されます。入力信号はすべて単一のカウンタの CCP 入力に送られます。PHA と PHB は CCP0 と CCP1 にマップされ、IDX は個別の入力として取り込まれるようになります。

このリファレンス デザインは、以下のように 3.3V または 5V レベルのホール効果センサをサポートしています。

- 3.3V ホール効果センサまたは QEI センサを使用する

- Hall1V33, Hall2V33, Hall3V33 をすべてオンにする
- R64, R65, R66 の実装を解除する
- 5V ホール効果センサまたは QEI センサを使用する
- スイッチャ S1 の Hall1V33, Hall2V33, Hall3V33, QEI1GND, QEI2GND, QEI3GND をすべてオフにする
- R64, R65, R66 を実装する

図 3-6 に、ホールおよび QEI インターフェイス回路を示します。

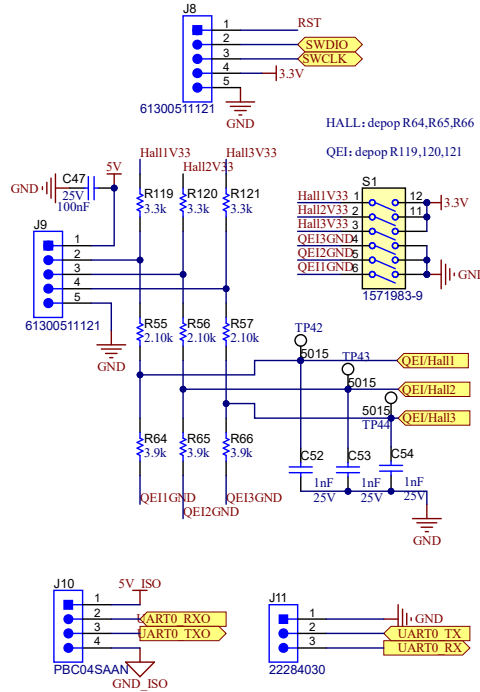


図 3-6. ホールおよび QEI インターフェイス回路

### 3.8 ソフトウェア デバッグ用 DAC

このリファレンス デザインは、ソフトウェア デバッグを簡素化するために、回転子角度、簡素化された相電流、PWM デューティなどの指定された信号をエクスポートする 2 つの DAC を提供します。図 3-7 に示すように、DAC は独立した内部 12 ビット D/A コンバータです。図 3-7 の DAC2 は間接的な 8 ビット D/A コンバータであり、内部オペアンプ OPA0 経由でバッファする必要があります。ただし、相電流センシングに OPA0 を使用する場合、オペアンプは DAC2 を出力できません。図 3-7 に、D/A コンバータの回路を示します。

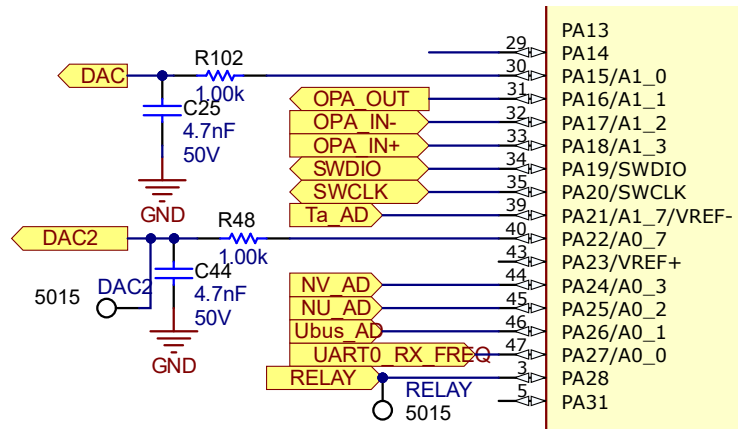


図 3-7. D/A コンバータ



### 3.9 過電流保護

このリファレンス デザインは、外部オペアンプと内部コンパレータの両方を使用して過電流保護 (OCP) を実装しています。図 3-8 に、外部オペアンプの OCP を示します。この回路は 3 相の電流をまとめ、リファレンス電圧 (0.2V) と比較して過電流フォルト信号を生成します。もう 1 つの OCP は、単一のシャント抵抗電流センシング用の内部コンパレータです。内部オペアンプ出力を内部コンパレータに直接接続して、過電流保護を実現できます。設計された外部オペアンプの OCP トリガ ポイントは 6A ピークの相電流であり、内部コンパレータの OCP トリガ ポイントは内部リファレンス電圧で設定できます。

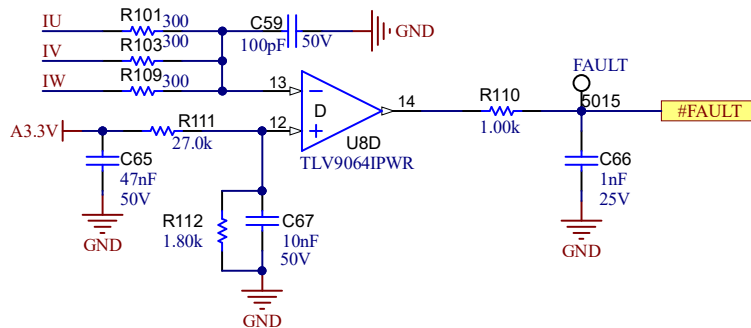


図 3-8. 外部過電流保護回路

### 3.10 過熱保護

M3 のねじ取り付け穴は、ヒートシンクにサーミスタを取り付けてヒートシンクの温度を検出するように設計されています。ソフトウェアはこの温度信号をサンプリングし、指定されたレベルで過熱保護をトリガできます。

### 3.11 絶縁型 UART ポート

J10 のホストコントローラと通信するために、絶縁型 UART ポートが用意されています。U10 アイソレータの絶縁側に電力を供給するために、外部の 5V または 3.3V レールが必要です。

### 3.12 インバータのピーク電力能力

このリファレンス デザインは 10A IGBT を使用しており、125°C の接合部温度で最大  $6A_{RMS}$  の連続電流を供給できます。 $6A_{RMS}$  は、TIDA-010250 設計の断続的な最大電流定格です。インバータの連続電流能力 ( $6A_{RMS}$  以下) は熱設計で決まります。 $GaN$  インバータのピーク電力能力 ( $P_{PEAK}$ ) は、3 相出力電圧 ( $V_{OUT}$ ) が  $200V_{RMS}$  でユニティ力率 (PF) と仮定した場合、式 1 で求められます。

$$P_{PEAK} = \sqrt{3} \times V_{OUT} \times I_{OUT} \times PF = \sqrt{3} \times 200 \times 6 \times 1 = 2078 \text{ W} \quad (1)$$

$P_{PEAK}$  は、 $GaN$  インバータが処理できる絶対最大電力であり、インバータの定格連続電力は熱設計、ピーク周囲温度、および過電流保護設定で決まります。

## 4 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、テスト結果

### 4.1 ハードウェア要件

このセクションでは、設計のボードおよびソフトウェアのテストと検証に必要な機器、テストのセットアップ、および手順について詳しく説明します。

#### 4.1.1 ハードウェア ボードの概要

図 4-1 に、このリファレンス デザインのシステム ブロック図を示します。

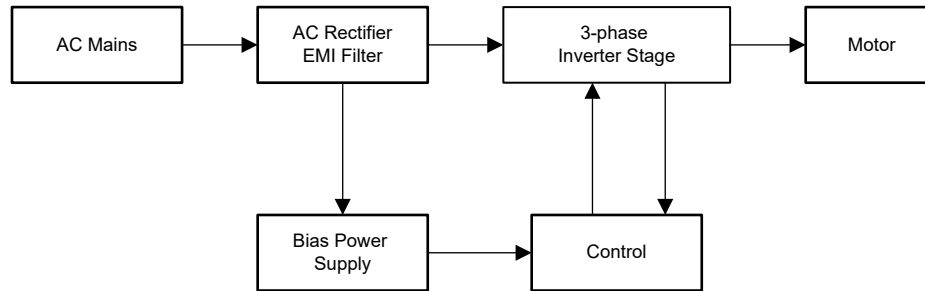


図 4-1. TIDA-010250 システム ブロック図

モーター制御ボードには、完全なモーター ドライブ システムを実現する機能グループがあります。以下に、ボード上のブロックとブロックの機能の一覧を示します。図 4-2 に、ボードの上面図と TIDA-010250 PCB のさまざまなブロックを示します。

- AC 入力コネクタとフィルタ
- 補助電源
- MCU コントローラ
- モーター インバータ出力コネクタ
- シャント抵抗を使用した相電流センシング
- ホールまたは QEI インターフェイス
- USART シリアル通信

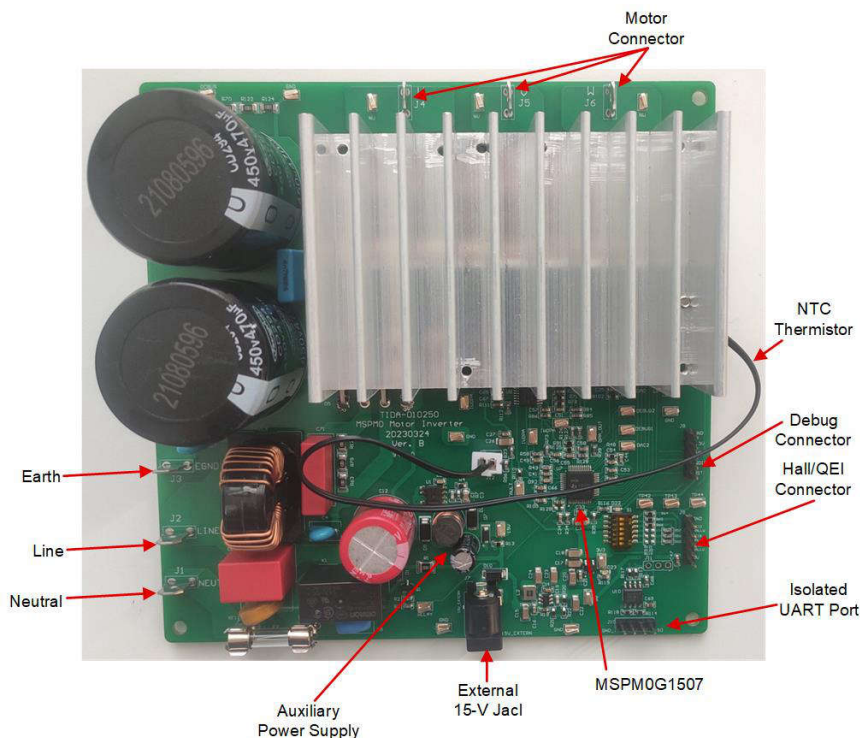


図 4-2. M0 モーター インバータ ボードのレイアウト

ボードを使用する際には、以下の事項に注意を払うことを推奨します。

- ボードに通電しているときは、ボードのどの部分にも触れないでください。また、ボードに接続されている部品にも触れないでください。
- AC 電源 (壁面コンセント) を使用してキットに電力を供給します。絶縁型 AC ソースを推奨します。
- 通電中は、ボード、キット、または部品のどの部分にも触れないでください。パワー モジュールのヒートシンクはボードから絶縁されていますが、高電圧スイッチングにより、ヒートシンク本体にある程度の容量性結合電圧が生成されます。
- 制御グラウンドは高温になる可能性があります。

#### 4.1.2 ボードの検証用のテスト機器

ボードの検証には、次の機器が推奨されます。

- 絶縁型 AC ソース
- 単相電力アナライザ
- デジタル オシロスコープ
- マルチメータ
- 3 相 PMSM モーター
- 動力計
- 最大 6A の電流を供給する DC 電流源
- 15V<sub>DC</sub> 電源を推奨
- 3 相電力アナライザ

## 4.2 ソフトウェア要件

### 4.2.1 MSPM0 ファームウェアの概要

テキサス・インスツルメンツが提供するリンクから、[MSPM0-SDK](#) mspm0\_sdk\_2\_01\_00\_03 またはそれ以降のソフトウェアをダウンロードしてインストールしてください。この MSPM0 SDK ソフトウェアはデフォルトフォルダにインストールしてください。次に、TIDA010250 ソフトウェア プロジェクトは、  
`<install_location>\ti\mspm0_sdk_2_01_00_03\examples\nortos\LP_MSPM0G3507\motor_control_bldc_sensorless_foc\sensorless-foc_TIDA010250\` の MSPM0 SDK フォルダ内にあります。

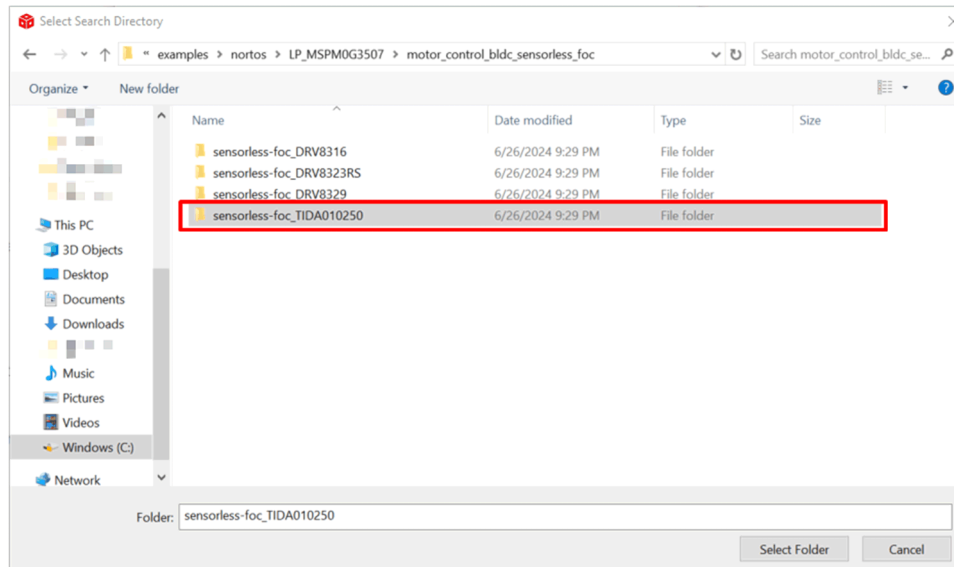
#### 4.2.1.1 ボード テストに必要なソフトウェアのダウンロードとインストール

1. テキサス・インスツルメンツが提供するリンクから、[MSPM0-SDK](#)、mspm0\_sdk\_2\_01\_00\_03 またはそれ以降のソフトウェアをダウンロードしてインストールしてください。
2. MSPM0-SDK を次のいずれかの方法でインストールします。
  - CCS に移動し、「Project」→「Import CCS Project」で、sensorless-foc\_TIDA010250 フォルダを参照して選択し、このプロジェクトをインポートします。
  - CCS にアクセスし、[View] → [Resource Explorer] に進みます。テキサス・インスツルメンツの Resource Explorer で、「Arm ベースのマイコン」→「組み込みソフトウェア」→「MSPM0-SDK」の順に選択し、「ダウンロード / インストール」をクリックします。
3. インストールが完了したら、CCS を閉じ、プロジェクトをインポートするための新しいワークスペースを作成します。

#### 4.2.1.2 プロジェクトを CCS にインポート

CCS を開き、「Project」→「Import CCS Project」を選択し、MSPM0 SDK の次のフォルダを参照します。

`<install_location>\ti\mspm0_sdk_2_01_00_03\examples\nortos\LP_MSPM0G3507\motor_control_bldc_sensorless_foc\sensorless-foc_TIDA010250、` [図 4-3](#) にフォルダを示します。



**図 4-3. sensorless-foc\_TIDA010250 のフォルダ**

図 4-4 に、このフォルダ内にあるプロジェクトを示します。プロジェクトを選択し、「Finish」ボタンをクリックして、このプロジェクトをインポートします。

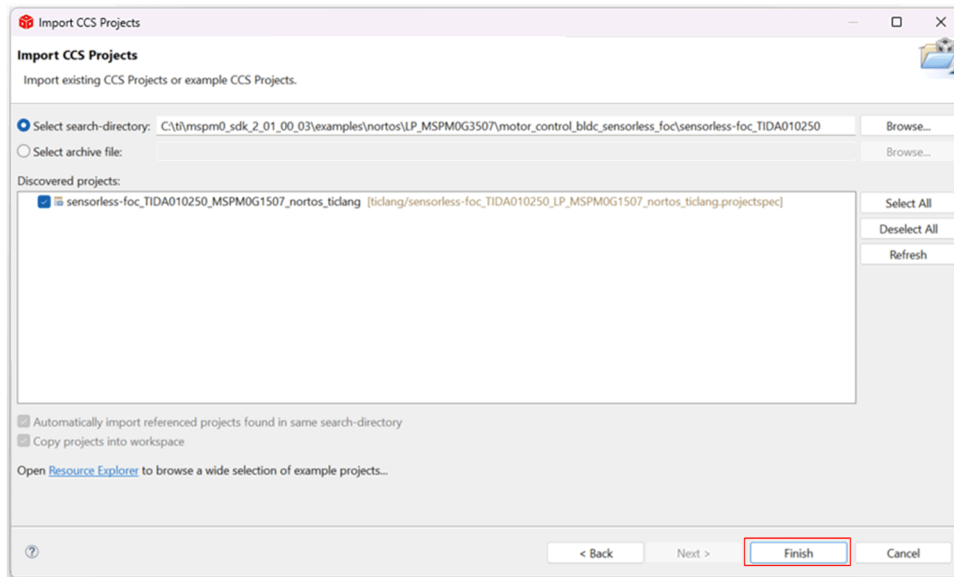


図 4-4. このフォルダのプロジェクト

#### 4.2.1.3 プロジェクトのコンパイル

これで、TIDA-010250 の `sensorless_foc` プロジェクトがアクティブになりました。「Build」ボタンをクリックするか、「Project」→「Build Project」メニューを選択すると、コンパイルの完了後に `.out` ファイルが生成されます。図 4-5 は、結果として得られたプロジェクトのビルドを示します。

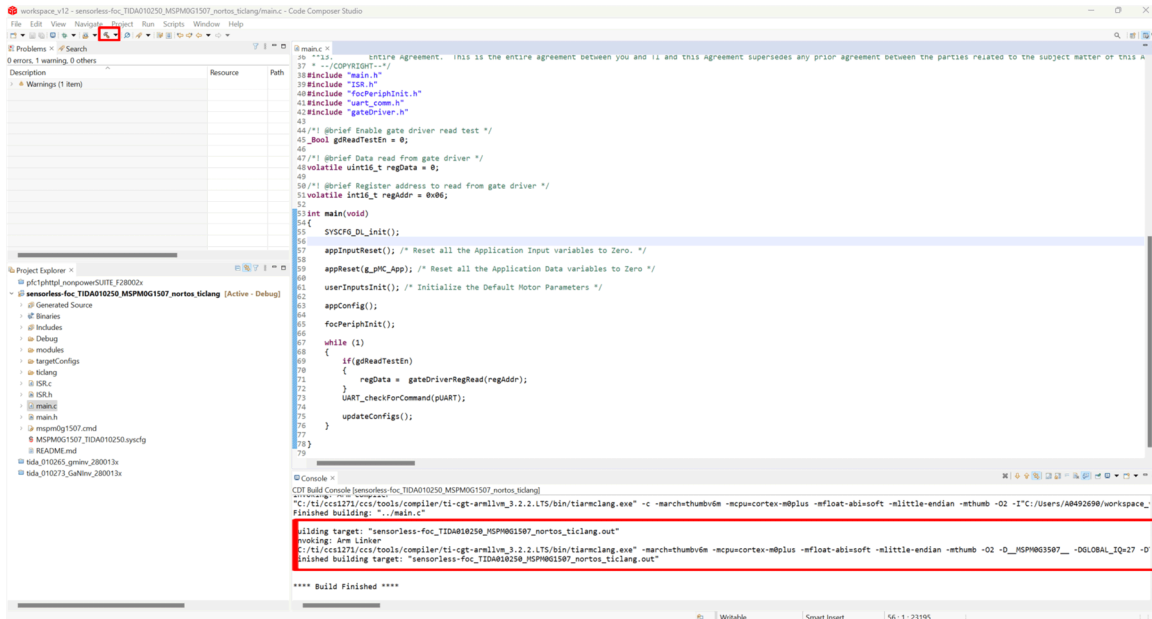


図 4-5. プロジェクトのビルド

ここで `ISR.c` ファイルを開き、モーター パラメータを確認します。『センサレス FOC モーター制御ユーザー ガイド』の「レジスタ マップ」セクションを参照してください。このガイドは、MSPM0 SDK フォルダにあります。

<install\_location>\ti\mspm0\_sdk\_2\_01\_00\_03\docs\english\middleware\motor\_control\_bldc\_sensorless\_foc

図 4-6 はファイルの場所を示します。

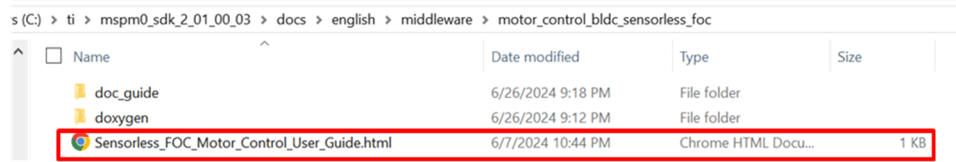
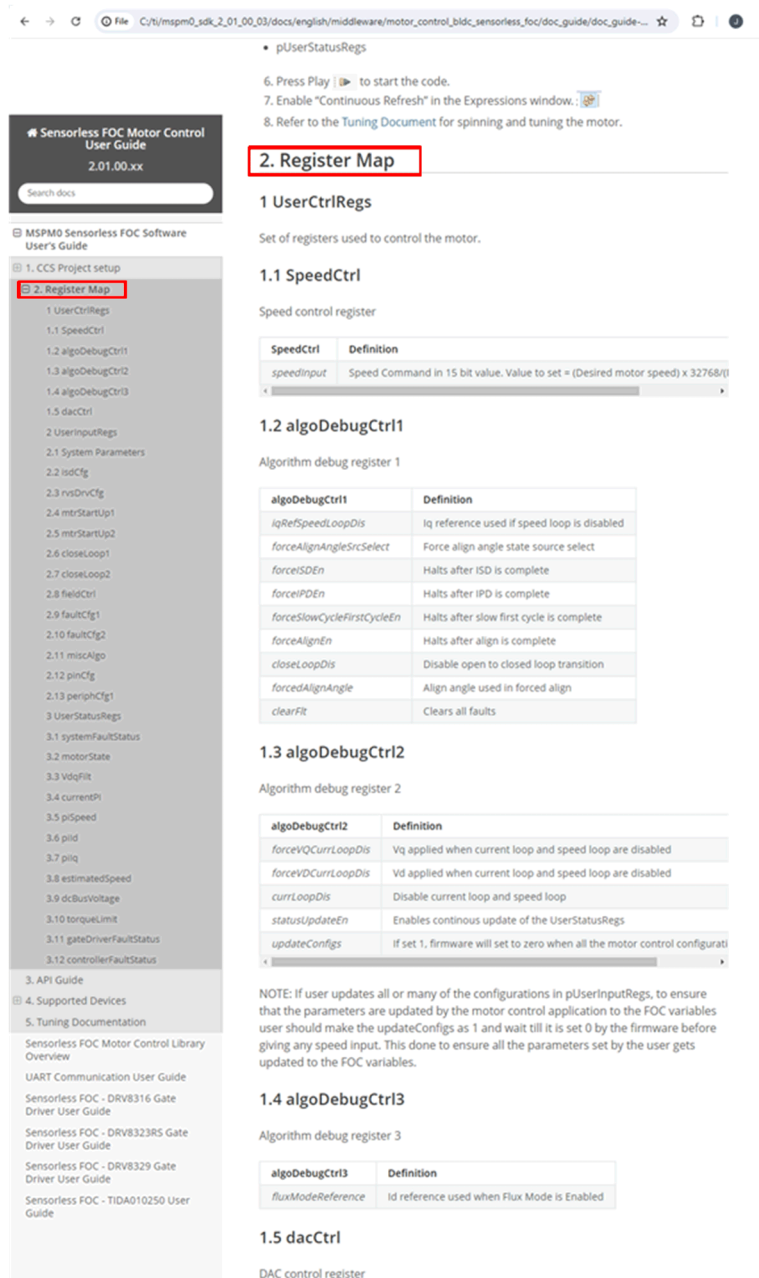


図 4-6. センサレス FOC モーター制御ユーザーガイドのフォルダ

この設計ガイドでは、FOC アルゴリズムのすべてのレジスタについて紹介しています。また、設計者はこれらのレジスタを使用して、FOC のいくつかの特殊関数を追加または削除することもできます。図 4-7 はレジスタ マップを示します。



2. Register Map

1 UserCtrlRegs

Set of registers used to control the motor.

1.1 SpeedCtrl

Speed control register

SpeedCtrl	Definition
speedInput	Speed Command in 15 bit value. Value to set = (Desired motor speed) x 32768/1

1.2 algoDebugCtrl1

Algorithm debug register 1

algoDebugCtrl1	Definition
iqRefSpeedLoopDis	Iq reference used if speed loop is disabled
forceAlignAngleSrcSelect	Force align angle state source select
forceISDEn	Halts after ISD is complete
forceIPDEn	Halts after IPD is complete
forceSlowCycleFirstCycleEn	Halts after slow first cycle is complete
forceAlignEn	Halts after align is complete
closeLoopDis	Disable open to closed loop transition
forcedAlignAngle	Align angle used in forced align
clearFlt	Clears all faults

1.3 algoDebugCtrl2

Algorithm debug register 2

algoDebugCtrl2	Definition
forceVQCurLoopDis	Vq applied when current loop and speed loop are disabled
forceVDCurrLoopDis	Vd applied when current loop and speed loop are disabled
currLoopDis	Disable current loop and speed loop
statusUpdateEn	Enables continuous update of the UserStatusRegs
updateConfigs	If set 1, firmware will set to zero when all the motor control configurati

NOTE: If user updates all or many of the configurations in pUserInputRegs, to ensure that the parameters are updated by the motor control application to the FOC variables user should make the updateConfigs as 1 and wait till it is set 0 by the firmware before giving any speed input. This done to ensure all the parameters set by the user gets updated to the FOC variables.

1.4 algoDebugCtrl3

Algorithm debug register 3

algoDebugCtrl3	Definition
fluxModeReference	Id reference used when Flux Mode is Enabled

1.5 dacCtrl

DAC control register

図 4-7. レジスタ マップ

モーターおよび制御パラメータは **ISR.c** にあり、ユーザーのモーターおよびシステムごとに更新できます。モーター **EMJ\_04APB22** のパラメータ、各パラメータの単位を以下に示します。詳細については、『**MSPM0 センサレス FOC チューニングガイド**』アプリケーション ノートを参照してください。

```

pUserInputRegs->systemParams.mtrResist = 2627; // Rs(mR)
pUserInputRegs->systemParams.mtrInductance = 8608; // Ls(uH)
pUserInputRegs->systemParams.mtrBemfConst = 3779; // 10*BEMP, BEMF(mvphz)
pUserInputRegs->systemParams.voltageBase = 258.6; // Vbase(V)/sqrt(3)
pUserInputRegs->systemParams.currentBase = 8.25; // Ibase(A)
pUserInputRegs->systemParams.maxMotorSpeed = 200; // Maximum Speed(Hz)
pUserInputRegs->systemParams.speedLoopKp = 0.0539; // Speed Loop Kp
pUserInputRegs->systemParams.speedLoopKi = 0.036; // Speed Loop Ki
pUserInputRegs->systemParams.currLoopKp = 3.42; // Current Loop Kp
pUserInputRegs->systemParams.currLoopKi = 3678; // Current Loop Ki
    
```

モーターおよび制御パラメータを更新したら、「コンパイル」ボタンをクリックします。エラー情報はなく、「コンソール」ウィンドウに **.out** ファイルが作成されます。図 4-8 を参照してください。

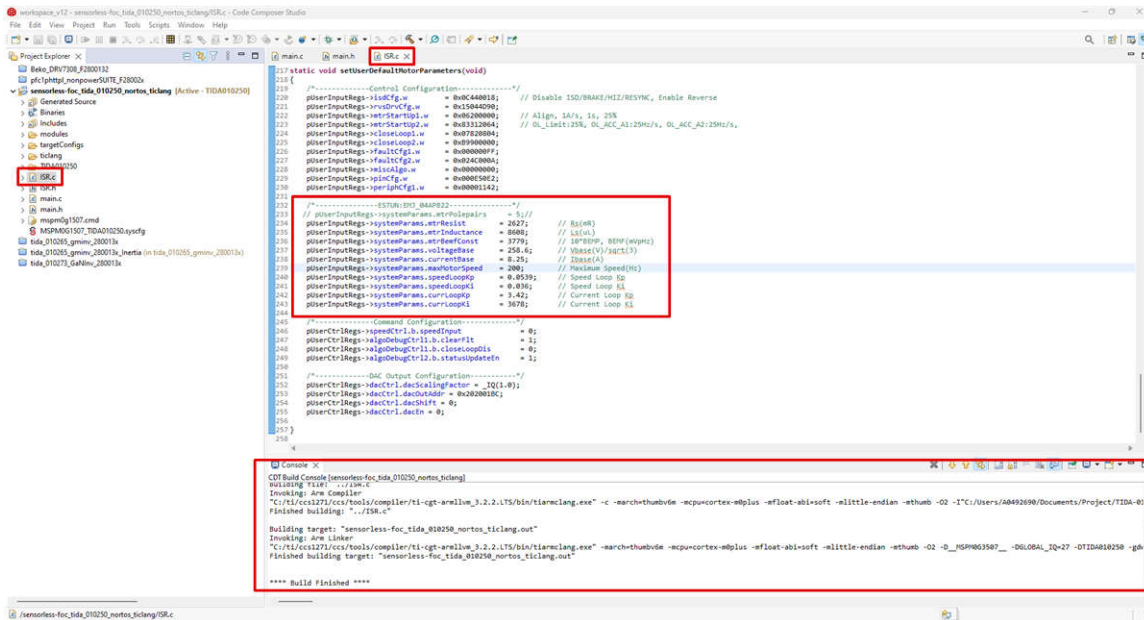


図 4-8. EMJ\_04APB22 モーター パラメータおよびコンパイル結果

#### 4.2.1.4 ダウンロード イメージとモーターの回転

「Run」→「Debug」メニュー オプションをクリックして CCS にソフトウェアをダウンロードしてデバッグし、次に pUserCtrlRegs 変数を「Expressions」ウィンドウに追加し、「pUserCtrlRegs」→「speedCtrl」→「b」→「speedInput」を選択して右クリックし、「Q-Values」→「Q-Value(15)」を選択します。図 4-9 は値の種類を変更する場所と方法を示します。

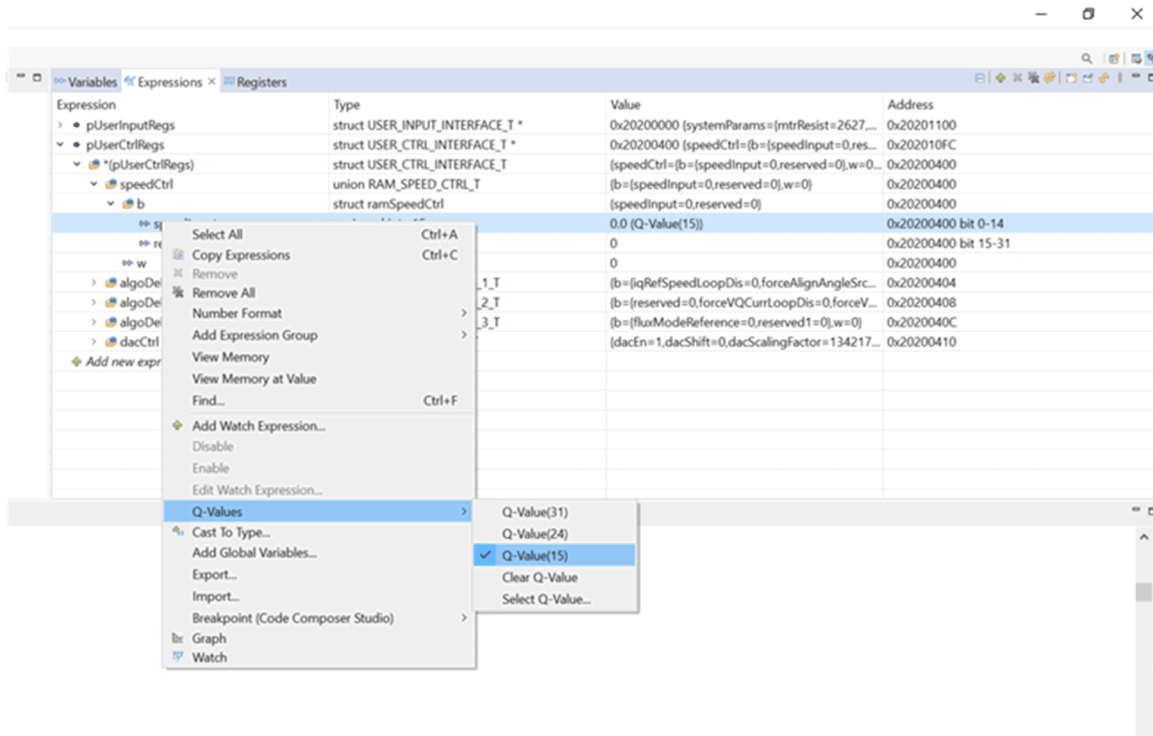


図 4-9. ダウンロードとデバッグ

CCS で「Run」ボタンをクリックしてコードを実行し、speedInput をゼロ以外の値に変更してモーターを回転させます。たとえば、0.6 という数字は最大速度の正規化番号なので、speedInput = 1 の場合、モーターは最大速度で動作します。モーターを停止するには、speedInput を 0 に設定します。

図 4-10 は speedInput 値を変更する場所を示します。

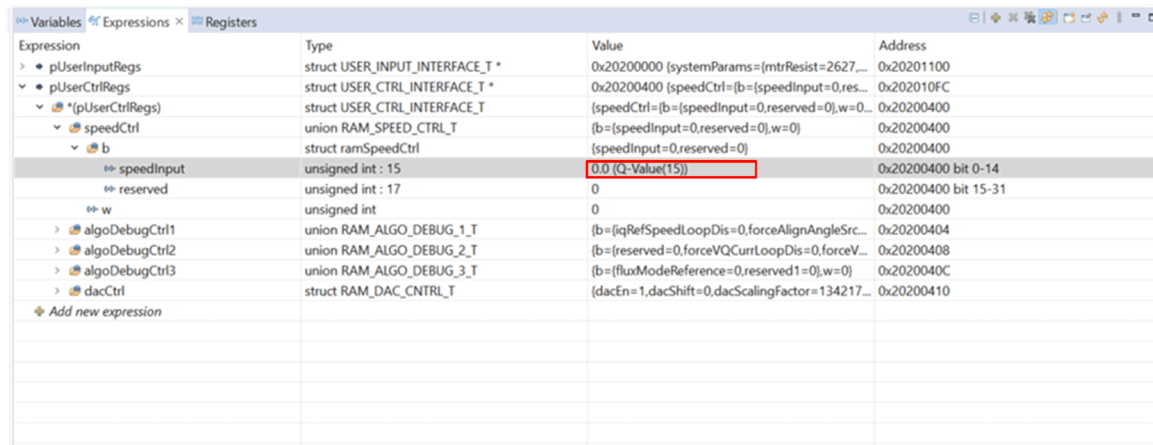


図 4-10. モーター速度の割合を speedInput で設定



## 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、PMSM 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 テスト設定

図 4-2 は、ボード上のブロックとコネクタの位置を示しています。テストを構成するには、次の手順を実行します。

1. シリアル ワイヤ デバッグ (SWD) エミュレータをコネクタ J8 に接続し、MSPM01507 のデバッグまたはプログラムを行います。ホスト PC を TIDA-010250 ボードから絶縁します。
2. モーター ケーブルを端子 J4、J5、J6 に接続します。
3. DC バス電源、AC 電源、または AC 主電源を J1、J2、J3 に接続して、電源をインバータに印加します。
  - DC 電源の最大出力は 380VDC です。
  - AC 電源の最大出力は 265VAC、50/60Hz です。
  - AC 主電源は 220VAC、50/60Hz です。

### 4.3.2 補助電源のテスト

図 4-11 に、15V<sub>DC</sub> 出力における 200mA 負荷時の降圧電源の波形を示します。

- CH1 (青): 15V 電圧レール
- CH3 (紫): UCC28881 のピン 1 のスイッチング ノード
- CH4 (緑): 15V 出力電流

図 4-12 に、周囲温度が 25°C の場合の 15V、100mA での降圧インダクタ温度を示します。

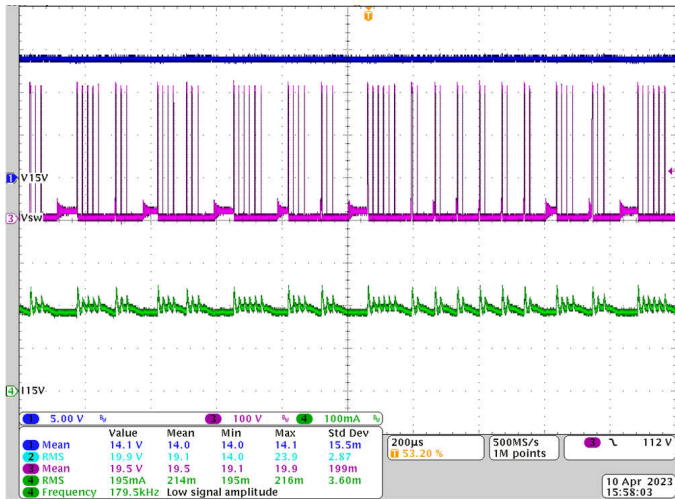


図 4-11. 220V<sub>AC</sub>、200mA での UCC28881 の波形

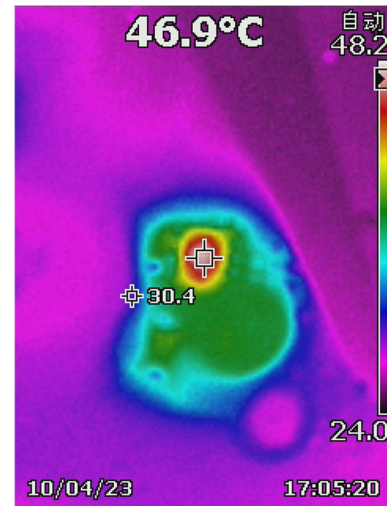


図 4-12. 220V<sub>AC</sub>、100mA での降圧電源のインダクタ温度上昇

### 4.3.3 電流開ループテスト

このテストでは、開ループモードで正弦波相電流を生成するソフトウェアの動作を示します。図 4-13 に、波形を示します。

- CH2 (シアン): AC 入力電圧
- CH3 (紫): DC バス電圧
- CH4 (緑): 位相 U の電流

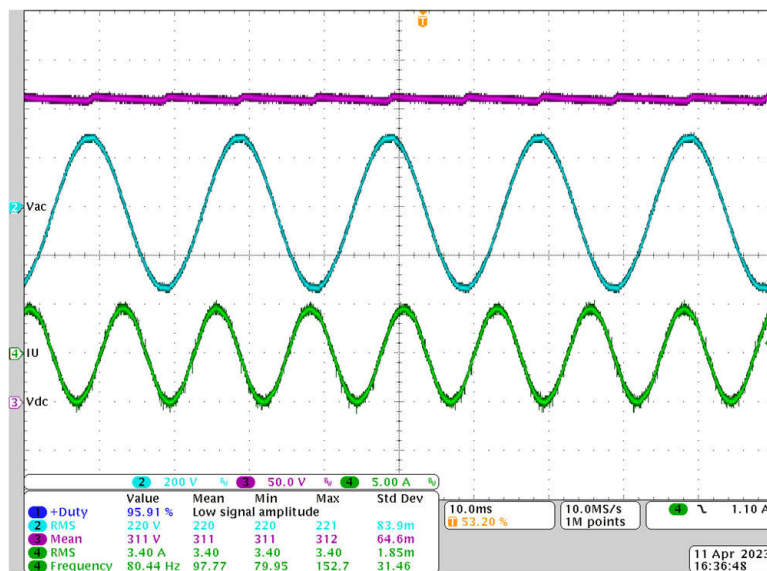


図 4-13. 開ループモードでの相電流

#### 4.3.4 過電流保護のテスト

このテストは、外部の 15V<sub>DC</sub> 電源を使用して実施できます。このテストでは次の手順を実行します。

1. DC コネクタ J7 からの外部 15VDC 電源を使用して、ボードに電力を供給します。
2. DC 電源をシャント抵抗 R67 の 2 つの端子に接続します。
3. DC 電源を定電圧モードと最大電流に設定します。
4. 出力をイネーブルにすると、サージ出力電流が R67 を流れます。
5. 電源電圧と電流出力を調整します。
6. サージ電流が OCP をトリガするのに十分な大きさ (> 6.5ADC) であることを確認します。

図 4-14 は、電流が 6A を超えるとフォルト信号が Low になることを示しています。立ち下がり時間は 2μs 未満であり、ほとんどの IGBT を保護するのに十分な速度です。

- CH1 (青): テストポイント #FAULT でのフォルト信号
- CH4 (緑): R67 の電流

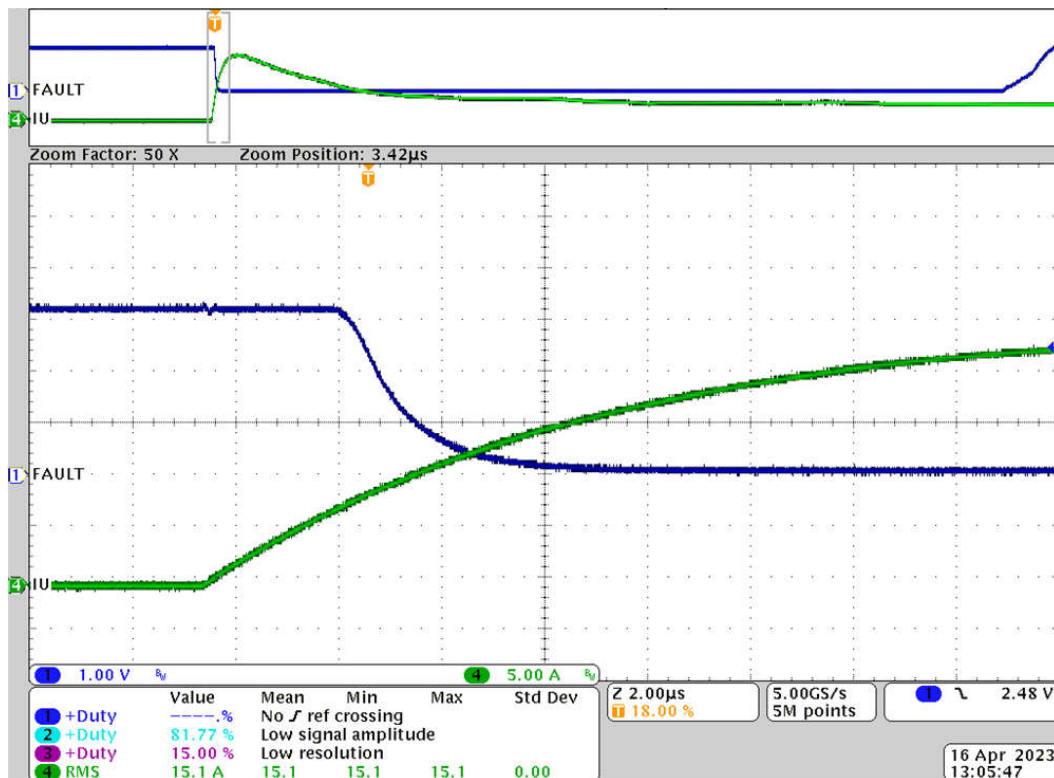


図 4-14. 過電流保護応答時間

### 4.3.5 モーターの起動シーケンス

図 4-15 に、センサレス FOC アルゴリズムを使用した PMSM モーターの起動シーケンス波形を示します。このシーケンスは通常、調整、開ループ ランプ アップ、速度閉ループの 3 つのフェーズで構成されます。調整中に次の手順を実行します。

1. サージ電流を防止するために、調整電流を徐々に増やします。
2. 開ループ ランプ アップに移行します。
3. ランプ アップ電流は、起動負荷要件を満たすように設定できます。
4. 回転子位置オブザーバがランプ アップ時間中に動作を開始します。
5. モーターの速度が設定ポイントに達し、回転子角度の誤差が十分小さくなると、ソフトウェアは閉速度と閉電流ループに移行します。

図 4-15 には、以下に示すチャンネルが示されています。

- CH1 (青): 観測された回転子角度
- CH2 (シアン): AC 入力電圧
- CH3 (紫): DC バス電圧
- CH4 (緑): 位相 U の電流

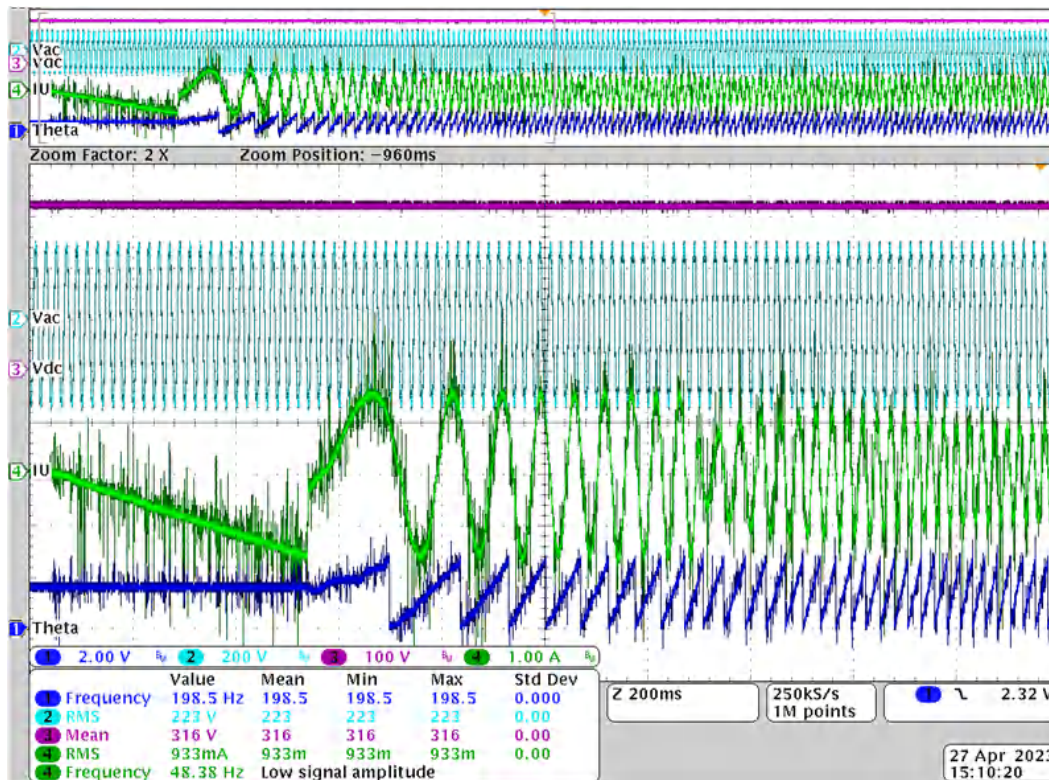


図 4-15. センサレス FOC アルゴリズムを使用した PMSM のモーター起動シーケンス

### 4.3.6 負荷テスト

熱設計全体を検証するために、負荷テストを実施しました。図 4-16 に、460W 負荷でのボード温度の上昇を示します。ヒートシンクの温度はわずか 32°C です。ヒューズとダイオードブリッジは最も高温の場所ですが、まだ十分な余裕があり、ヒューズカバーを取り外すと冷却できます。

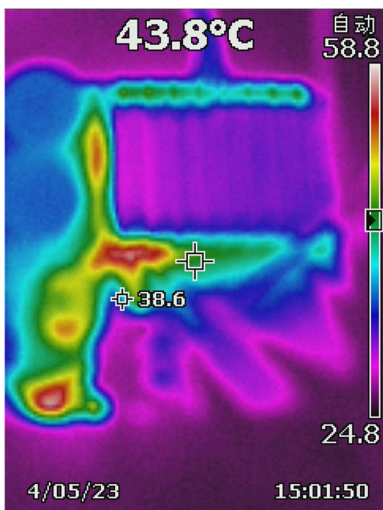


図 4-16. 460W 負荷での  
ボード温度の上昇

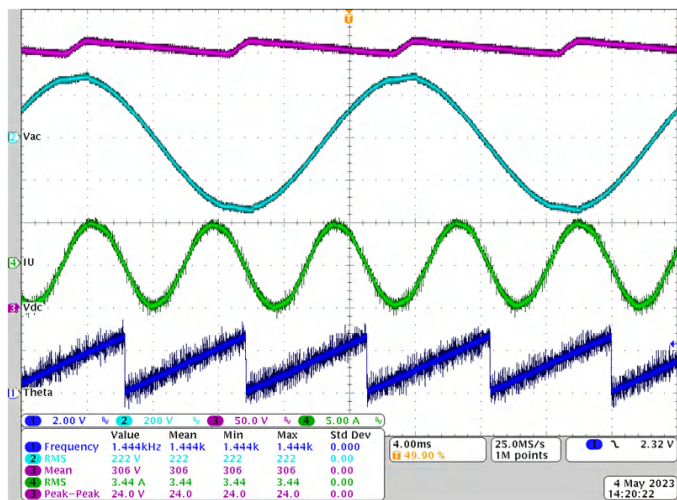


図 4-17. 460W 負荷でのテスト波形

図 4-17 に、以下のチャンネル割り当てにおける、460W 負荷でのテスト波形を示します。

- CH1 (青): 観測された回転子角度
- CH2 (シアン): AC 入力電圧
- CH3 (紫): DC バス電圧
- CH4 (緑): 位相 U の電流

図 4-18 に、動力計を使用した負荷テスト構成を示します。

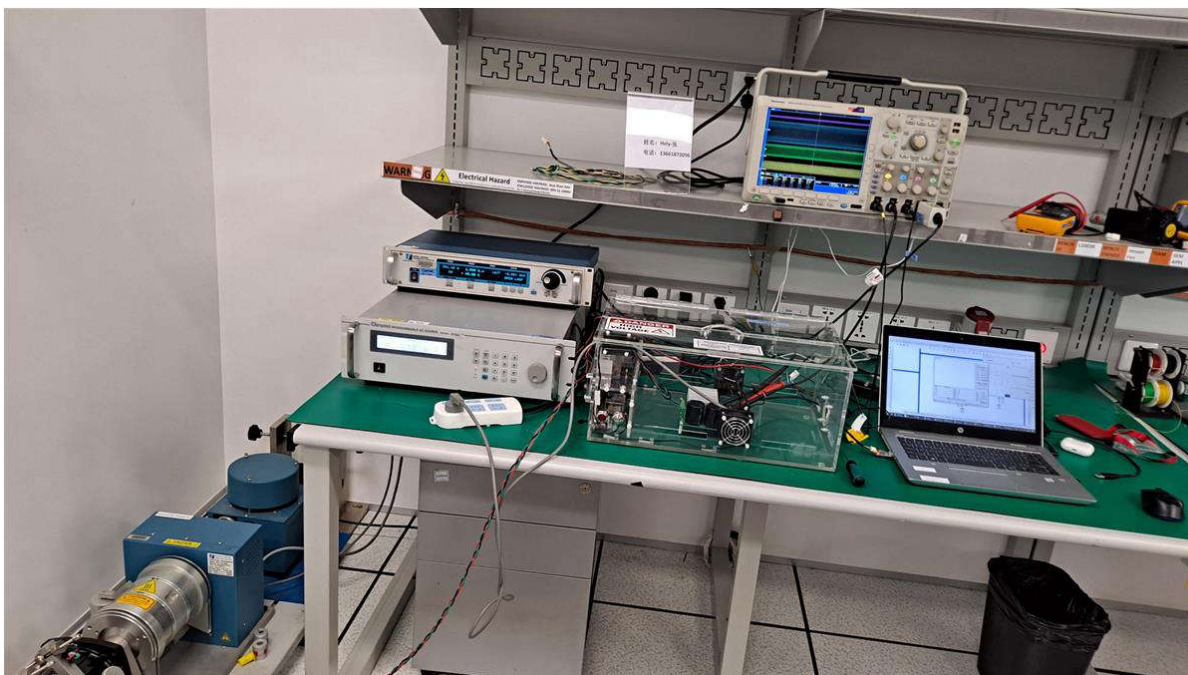


図 4-18. 負荷テスト構成

## 4.4 新しいハードウェア ボードへのファームウェアの移行

### 4.4.1 PWM、CMPSS、ADC モジュールの構成

SYSCFG\_DL\_init () には初期化関数があります。main.c で SYSCFG\_DL\_init() を見つけ、CTRL を押して関数をクリックすると、SYSCFG\_DL\_init() が開かれ、GPIO、ADC、PWM などを構成する関数は SYSCFG\_DL\_init() にあります。図 4-19 に、これらの関数を示します。

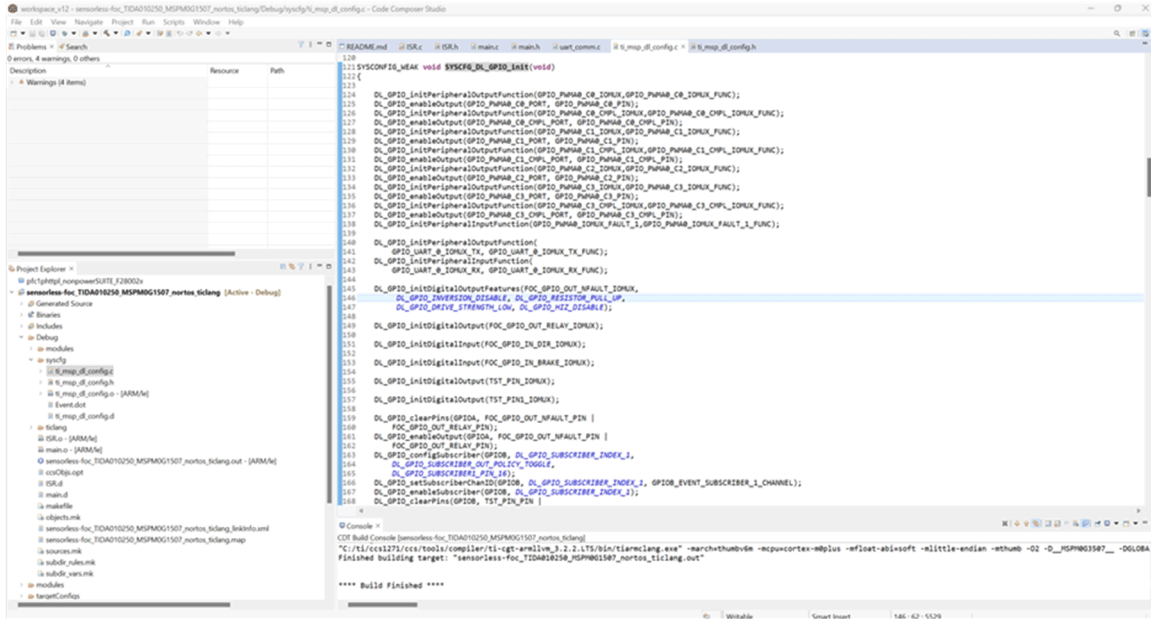


図 4-19. 初期化用の GPIO、ADC、PWM 関数

「Debug」→「syscfg」→「ti\_msp\_dl\_config.h」では、GPIO、PWM、ADC に対するすべての定義が見つかり、新しいハードウェア ボード用に更新できます。図 4-20 に、その定義を示します。

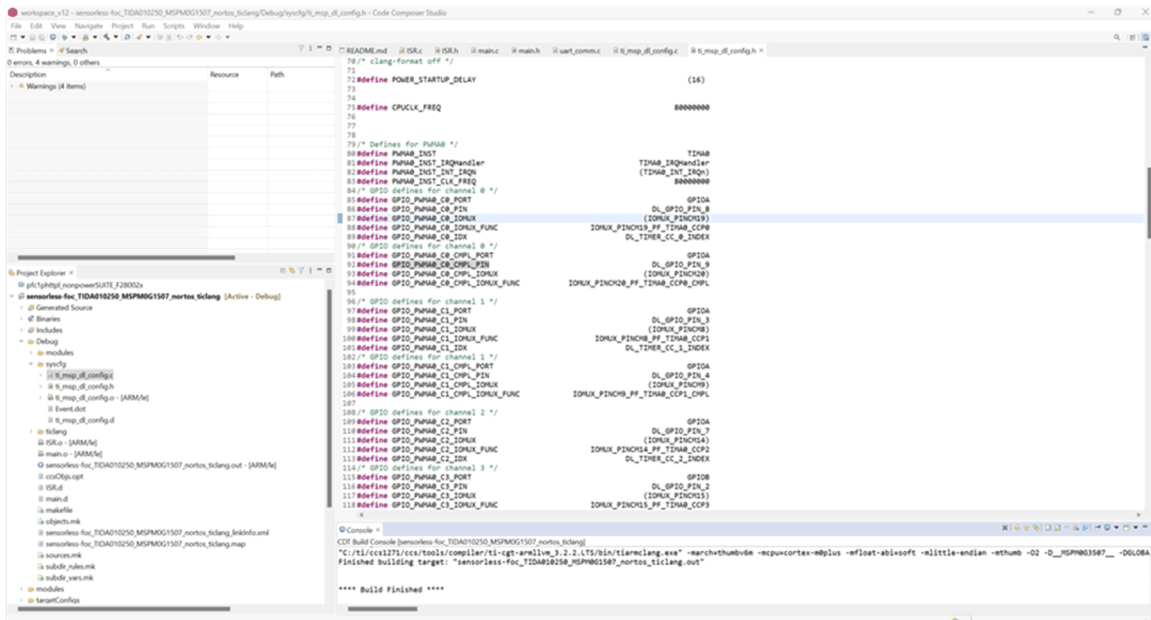


図 4-20. GPIO、ADC、PWM の定義

#### 4.4.2 モーターと制御パラメータの調整

モーターおよび制御パラメータの調整の詳細については、『[MSPM0 センサレス FOC チューニング ガイド](#)』アプリケーション ノートを参照してください。

## 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、[TIDA-010250](#) の設計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-010250](#) の設計ファイルを参照してください。

### 5.2 ツール

#### ツール

##### Code Composer Studio™

Code Composer Studio® (CCS) は、テキサス・インスツルメンツのマイクロコントローラとプロセッサ向けの統合開発環境 (IDE) です。CCS は、組み込みアプリケーションの開発とデバッグに必要な一連のツールで構成されます。Code Composer Studio は、Microsoft® Windows®, Linux®, macOS® デスクトップからダウンロードできます。ほかに、[テキサス・インスツルメンツ 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。

##### MSPM0-SDK

MSPM0 SDK は、MSPM0 MCU プラットフォーム向けアプリケーションの開発を迅速化するためのソフトウェア、ツール、文書の究極のコレクションを単一のソフトウェア パッケージに収録しています。

### 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、[『MSPM0G150x ミックスド シグナル マイクロコントローラ』データシート](#)
2. テキサス・インスツルメンツ、[『UCC28881 700V、225mA の低静止電流オフライン コンバータ』データシート](#)
3. テキサス・インスツルメンツ、[『UCC27712 インターロック搭載、620V、1.8A、2.8A ハイサイド/ローサイド ゲートドライバ』データシート](#)
4. テキサス・インスツルメンツ、[『TLV906xS 低コスト システム用の 10MHz、RRIO、CMOS オペアンプ』データシート](#)
5. テキサス・インスツルメンツ、[『TPS54202 4.5V~28V 入力、2A 出力、EMI 適合同期整流降圧型コンバータ』データシート](#)
6. テキサス・インスツルメンツ、[『ISO672x 汎用基本デュアル チャネル デジタル アイソレータ、堅牢な EMC』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

TI E2E™ and テキサス・インスツルメンツ E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

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

Code Composer Studio®, Microsoft®, and Windows® are registered trademarks of Microsoft Corporation.

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

**HELY ZHANG** は テキサス・インスツルメンツのシステム アプリケーション エンジニアで、家電製品に関連する電力供給とモーター インバータの開発を担当しています。Hely は 2002 年に安徽理工大学からパワー エレクトロニクスの修士号を取得し、テキサス・インスツルメンツに入社する前は SolarEdge と General Electric で働いていました。

## 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。

<b>Changes from Revision A (April 2024) to Revision B (September 2024)</b>	<b>Page</b>
• このリファレンス デザインで使用されるデバイスとして MSPM0G1507 を確立 .....	1
• <a href="#">セクション 4.2</a> にコンテンツを追加.....	12
• <a href="#">セクション 4.4</a> を追加.....	22

<b>Changes from Revision * (May 2023) to Revision A (April 2024)</b>	<b>Page</b>
• <a href="#">セクション 2.2</a> で UCC54202 を TPS54202 に置き換え.....	4

## 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 © 2024, Texas Instruments Incorporated

## 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](#) 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 © 2024, Texas Instruments Incorporated