

Design Guide: TIDA-010979

産業用通信機能搭載、48V 1kW ロボット関節モーター制御のリファレンス デザイン



説明

このリファレンス デザインは、産業用イーサネット接続型のモータードライブを制御する TI の Sitaru™ MCU-AM261x デバイスを搭載しています。このデザインでは、直径 70mm のプリント基板 (PCB) を使用して、ヒューマノイド ロボットの関節 (48V、1kW の Eyoubot モーター) を駆動します。このデザインは、小型のフォーム ファクタと簡素化された統合プラットフォームを示すものです。このプラットフォームは、3 つの DRV7167 ハーフブリッジ GaN モーター ドライバ電力段を使用した高電力密度のセクション、AM2612 500MHz R5F コア マイコンと機能絶縁型デルタ シングマ変調器である AMC0106 を使用した高精度のリアルタイム制御段を採用しているほか、産業用イーサネットを通じた高帯域幅通信も備えています。

リソース

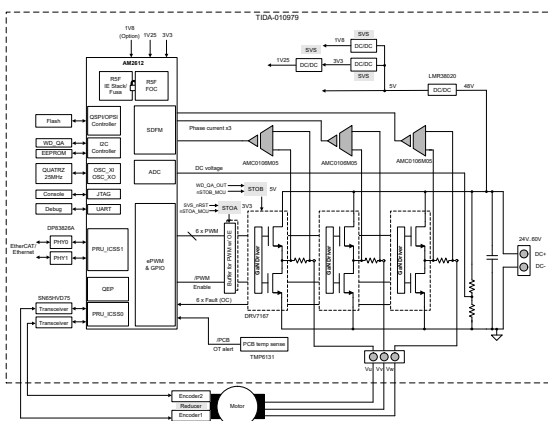
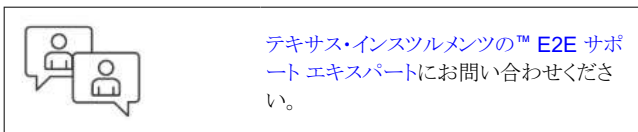
TIDA-010979	デザイン フォルダ
AM2612、DRV7167	プロダクト フォルダ
AMC0106、DP83826A	プロダクト フォルダ
AM261x モーター制御 SDK	ツール フォルダ

特長

- 直径 70mm の PCB と直径 15mm のスルー ホールに対応する高集積 IC を使用したコンパクトな設計
- マルチプロトコルの産業用イーサネット通信とマルチプロトコルのエンコーダ インターフェイスをサポート
- 小型フォーム ファクタの DRV7167 ハーフブリッジ GaN モーター ドライバの電力段
- 1mΩ シャントと AMC0106M05 機能絶縁型変調器を使用した高精度位相電流センス

アプリケーション

- ヒューマノイド (ヒト型ロボット) 向けモーター ドライブ
- 協働ロボット向けサーボドライブ
- 移動型ロボットのモーター制御
- ロボット通信モジュール
- サーボドライブの電力段モジュール



1 システムの説明

このリファレンス デザインは、TI の Sitara™ AM261x マイコンの能力を示すためのものです。このデバイスは、48V、1kW のロボット関節用に、直径 70mm のプリント基板 (PCB) を使用して、産業用イーサネット接続のリアルタイム サーボ モーター制御を処理します。

このデザインの制御部分には、AM261x マイコンに、閉ループの FOC (フィールドオリエンテッド コントロール) を実行するための小型の 10mm × 10mm BGA パッケージに封止された 1 つの 500MHz R5F コアと、EtherCAT スタックを実行するためのもう 1 つの 500MHz R5F コアが搭載されています。また、この AM261x マイコンでは 2 つのプログラマブル リアルタイムユニット産業用通信サブシステム (PRU-ICSS) を使用して、マルチプロトコル エンコーダと産業用イーサネット MAC 層をサポートしています。このリファレンス デザインでは、2 つの BissC デジタル エンコーダを使用して、回転子とレデューサの位置情報をフィードバックします。PRU-ICSS では、EnDAT、HDSL、BissC、Tamagawa など他のエンコーダ プロトコルもサポートできます。

電力部品は、100V、70A のハーフブリッジ GaN モータードライバの電力段である DRV7167A デバイスを 3 個搭載しており、ドライバと過電流保護機能を内蔵しているため、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に最適化されています。PCB には、上面冷却タイプの DRV7167A GaN モータードライバ電力段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。

このリファレンス デザインでは、高精度の位相電流検出を行うために、3 つの機能絶縁型デルタ シグマ変調器 AMC0106M05 デバイスと 3 つの 1mΩ 位相電流シャントを使用して、±50A の線形測定範囲で 3 相電流を測定します。デジタル インターフェイスにより AMC0106M05 とマイコンが接続され、SINC³ デシメーション フィルタが実行されます。

また、このリファレンス デザインでは、AM2612 マイコンと安全な電源アプローチを使用した独自の機能安全コンセプトも紹介します。この安全コンセプトは、1 つのマイコンで論理冗長性を実現するために安全性認定取得済みの CAT3、PLd、または PLe アーキテクチャを構築することを目的としています。

1.1 用語

SOC	システム オンチップ
FOC	フィールド指向制御
MCU	マイクロコントローラ ユニット
RPM	回転数 / 分
EnDAT/HDSL/BissC/ Tamagawa	アブソリュート エンコーダ向けのマルチ デジタル型双方向インターフェイス プロトコル
EtherCAT	Ethernet for Control Automation Technology の略
Profinet	プロセスフィールドネットワークのためのかばん語
ICSS	産業用通信サブシステム
PRU	プログラマブル リアルタイム ユニット
SDFM	シグマ-デルタ フィルタ モジュール
SDM	シグマ-デルタ モジュレータ
EPWM	拡張パルス幅変調
CMP	イベント コンパレータ
CAP	イベントのキャプチャ
ISR	割り込みサービス ルーチン
EPWM	拡張パルス幅変調
TCM	密結合メモリ
GPIO	汎用入出力
FIFO	先入れ先出し

SPI	シリアル ペリフェラル インターフェイス
PHP	ハイパーテキスト プリプロセッサ
PDO	PHP データ オブジェクト

1.2 主なシステム仕様

表 1-1. 主なシステム仕様

パラメータ	標準値	備考
DC 入力電圧	48V (12V ~ 60V)	絶対最大電圧 80V
最大 3 相連続出力電流	17A _{RMS}	テスト条件: 周囲温度 25°C でヒートシンクなし
最大出力電力	DC 48V 時に 1kW	力率 0.98 の場合
パワー FET のタイプ	GaN 技術	ハイサイド ゲートドライバおよびローサイド ゲートドライバ内蔵のハーフブリッジ パワー モジュール (DRV7167A)
PWM スイッチング周波数	20kHz ~ 100kHz	80kHz を超える PWM 周波数に対応
PWM デッドバンド	40ns	構成可能
機能絶縁型変調器	1mΩ シャント AMC0106M05	外部クロック対応、高精度、±50mV 入力、機能絶縁型、デルタ シグマ変調器
デルタ シグマ デジタル フィルタ	OSR64 または OSR32	PWM 周波数に応じて構成可能
位相電流最大範囲	±50A	MCU への 3.3V デジタル インターフェイス (クロック/データ)
PCB 層構成	6 層、1 オンスの銅	
PCB サイズ	直径 70mm、直径 15mm のスルーホール	
Encoder1	BissC、20 ビット分解能、シングル ターン	速度ループに使用
Encoder2	BissC、19 ビット分解能、シングル ターン	位置ループに使用

表 1-2 に、TIDA-010979 のインターフェイスとコネクタの仕様を示します。

表 1-2. インターフェイスとコネクタの仕様

ピン	信号	機能
J1-1	GND	JTAG
J1-2	JTAG_TMS	
J1-3	JTAG_TDI	
J1-4	JTAG_TCK	
J1-5	JTAG_TDO	
J1-6	3V3	
J2-1	GND	UART
J2-2	UART_TXD	
J2-3	UART_RXD	
J3	ジャンパ ON (QSPI) ジャンパ OFF (UART)	ブートモード
J4-1	H0_TD_N	PHY0 MDI
J4-2	H0_TD_P	
J4-3	H0_RD_N	
J4-4	H0_RD_P	
J5-1	H1_TD_N	PHY1 MDI
J5-2	H1_TD_P	
J5-3	H1_RD_N	
J5-4	H1_RD_P	
J6-1	GND	エンコーダ 1 RS485 インターフェイス
J6-2	ENC1_CLK_P	
J6-3	ENC1_CLK_N	
J6-4	ENC1_DATA_P	
J6-5	ENC1_DATA_N	
J6-6	ENC_5V0	
J7-1	GND	エンコーダ 2 RS485 インターフェイス
J7-2	ENC2_CLK_P	
J7-3	ENC2_CLK_N	
J7-4	ENC2_DATA_P	
J7-5	ENC2_DATA_N	
J7-6	ENC_5V0	

2 システム概要

2.1 ブロック図

図 2-1 の点線枠に TIDA-010979 システム ブロック図を示します。

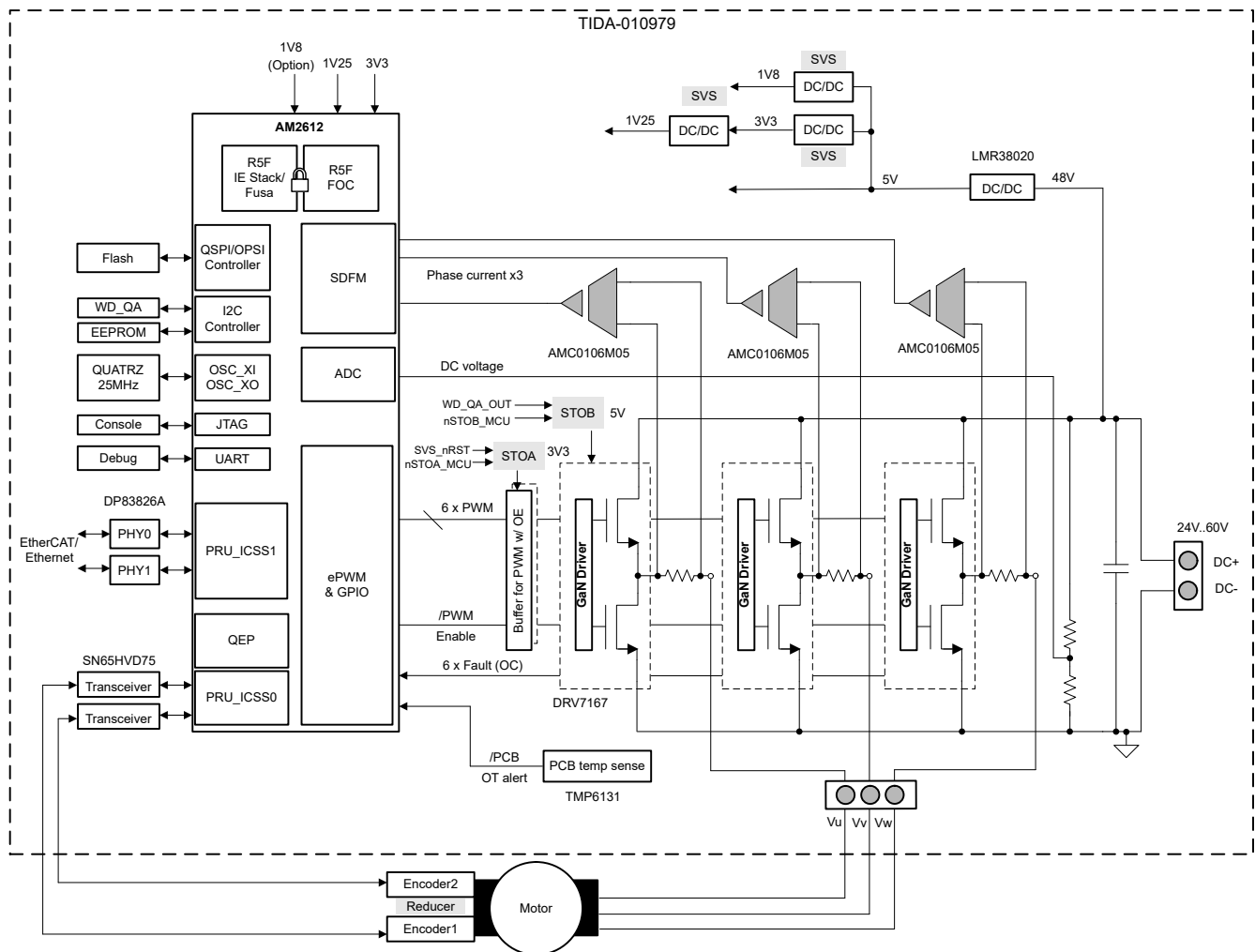


図 2-1. TIDA-010979 システム ブロック図

2.2 設計上の考慮事項

設計目標は、ヒューマノイド ロボットの関節用に統合された 1 軸サーボ制御を実装することです。この設計では、公称 48V、12V ~ 60V DC のシングル DC 入力電圧で動作し、AC モーターを駆動するための 3 相正弦波を出力します。この設計には、以下のサブシステムが含まれています。

- パワー ツリー – 入力電圧範囲の広い DC/DC コンバータ (LMR38020) は、GaN モータードライバの電力段、エンコーダの電源、ダウンストリームの 3.3V と 1.8V の各レールに電力を供給する 5V レールを生成します。AM2612 の 1V25 のコア電圧レールには、DC/DC モジュール (TPSM82823) を介して 3.3V から電力が供給されます。3.3V パワー モジュールは、電流センス変調器、PWM バッファ、EEPROM、イーサネット PHY、マイコン IO、その他のアナログ部品にも電力を供給します。
- パワー インバータ – 3 個のインバータ ハーフブリッジはそれぞれ、短絡および過熱保護機能を備えた 100V、70A ハーフブリッジ GaN モーター ドライバ電力段 (DRV7167A) を統合しています。
- 電流センス – インバータ相に 1mΩ の位相電流シャント抵抗と、±50A の線形測定範囲を持つ機能絶縁型変調器 (AMC0106M05) を採用し、マイコンとのデジタル インターフェイスにより高精度な電流検出を実現しています。

- 制御と通信 – モーター制御と通信に、リアルタイム制御、安全性、セキュリティ機能を備えた、500MHz デュアルコア Arm® Cortex®-R5F をベースにしたマイコン (AM2612) を採用しています。このサブシステムは、閉ループのフィールドオリエンテッド コントロール (FOC) を実行する 1 つの 500MHz R5F コアと、産業用イーサネット スタックを実行するもう 1 つの 500MHz R5F コアを搭載しています。また、2 個の PRU-ICSS コアはマルチプロトコル エンコーダと産業用イーサネット MAC 層をサポートしています。このリファレンス デザインでは、2 つの BissC デジタル エンコーダを使用して、回転子とレデューサの位置情報をフィードバックします。PRU-ICSS では、EnDAT®, HDSSL、BissC、Tamagawa® など他のエンコーダ プロトコルもサポートできます。各種イーサネット プロトコルに関して、AM2612 は EtherCAT®, EtherNet/IP、Profinet®, 標準イーサネットもサポートします。EtherCAT、IEEE、EMC に準拠した 2 つの 10/100Mbps イーサネット PHY (DP83826A) が採用されており、EtherCAT アプリケーションで短い確定的なレイテンシでシステム タイミングを実現できます。

2.3 主な使用製品

2.3.1 AM2612

AM261x Sitara Arm マイコンは、Sitara AM26x リアルタイム マイコン ファミリの製品で、次世代の産業用および車載用組込み製品の複雑なリアルタイム処理ニーズを満たすように開発されています。AM261x デバイスは、スケーラブルな Arm Cortex-R5F 性能と包括的なペリフェラル セットを備えており、広範なアプリケーション向けに設計されているほか、安全機能とリアルタイム制御向けに最適化されたペリフェラルを提供します。機能ブロック図を図 2-2 に示します。表 2-1 に、主な特長と利点を示します。

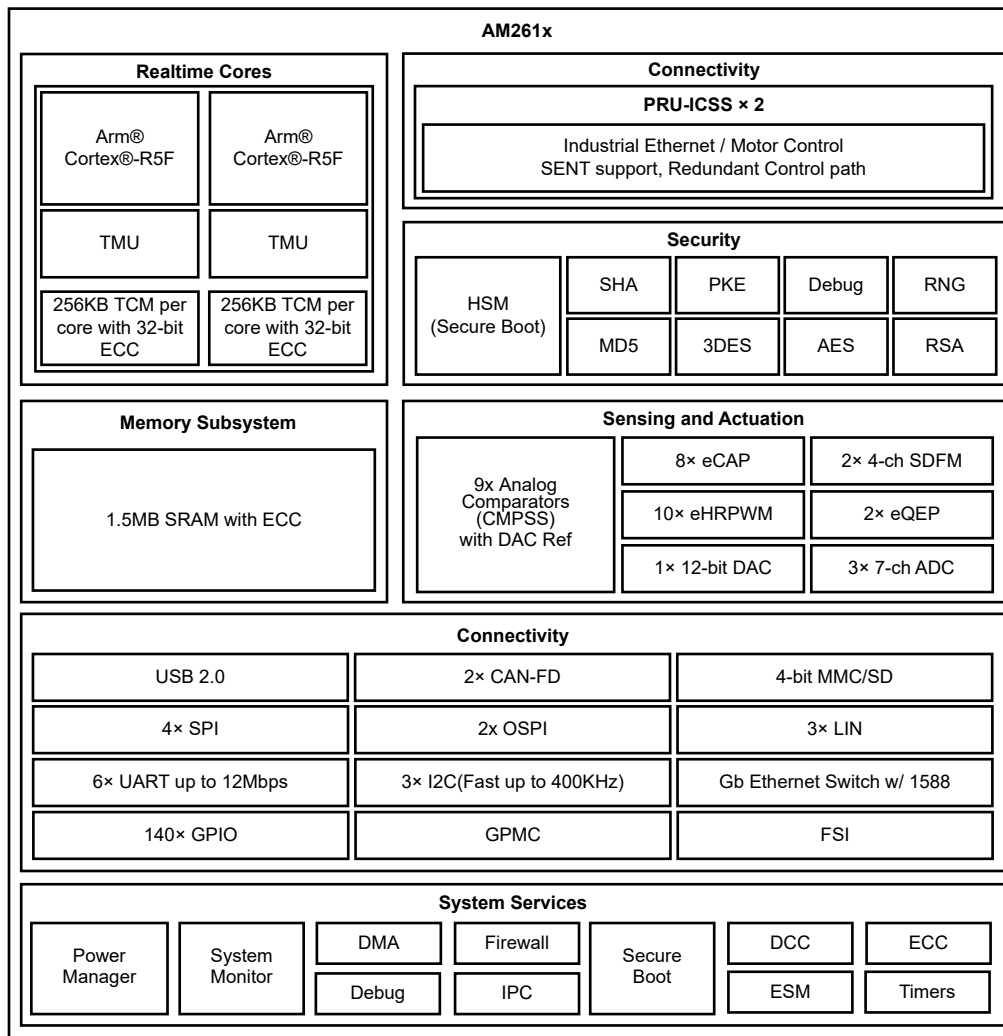


図 2-2. AM261x の機能ブロック図

表 2-1. AM261x の機能と特長

特長	利点
2K DMIPS と 512KB TCM を搭載したデュアル Cortex-R5F コア	複雑なリアルタイム処理のニーズに対応できる、高性能 CPU を実現
各 R5F に三角関数演算ユニット (TMU) を搭載	モーター制御用の三角関数を高速化
21 チャンネル 12 ビット ADC、10 × PWM (20 チャンネル)、18 × アナログ コンパレータ、8 × eCAP、8 チャンネル SDFM	低レイテンシ制御ループに適した複数のペリフェラル
2 基の PRU-ICSS、USB、統合型イーサネット スイッチ (CPSW)、最大 2 基のギガビット ポートを搭載し、カットスルーと TSN をサポート	通信および接続機能のオプションが豊富。PRU-ICSS を使用すると、EnDat2.2、Tamagawa、BiSS などのモーター制御フィードバックプロトコルが利用できます。また、EtherCAT、Ethernet/IP、Profinet、IO-Link などの産業用イーサネットプロトコルも有効にできます。
ロックステップ オプション、ハードウェア セキュリティ モジュール (HSM)	SIL3 機能安全認証済み。暗号アクセラレーション、セキュア ブート、HSM が管理する粒度の細かいファイアウォールにより、セキュアなシステム設計を実現できます。

2.3.2 DRV7167A

DRV7167A は、ゲートドライバと拡張モード ガリウム ナイトライド (GaN) FET を内蔵した 100V ハーフブリッジ GaN モータードライバ電力段です。図 2-3 に示すように、このデバイスは 2 つの GaN FET で構成され、1 つの高周波数 GaN FET ドライバによりハーフブリッジ構成で駆動されます。このデバイスは、両方の FET のターンオンおよびターンオフスルーレート制御、IO 制限コントローラで使用するシングル PWM モード、短絡保護 (SCP)、過熱検出 (OTD) およびゼロ電圧検出 (ZVD) レポートをサポートしており、第 3 クアドラント導通時間を最小化できます。表 2-2 に、主な特長を示します。

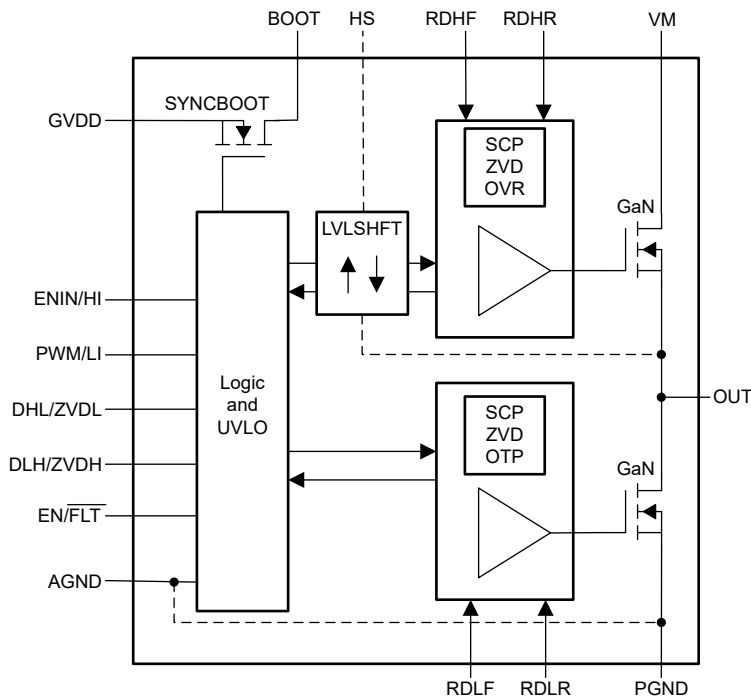


図 2-3. DRV7167A の機能ブロック図

表 2-2. DRV7167A の機能と特長

特長	利点
ハイサイドおよびローサイドの GaN ドライバと 100V GaN FET を内蔵した、70A DC 動作 2.2mΩ デバイス	80kHz の高スイッチング周波数で、最大 60VDC、16A _{RMS} 位相電流の 3 相インバータを可能にし、低インダクタンスおよび高速ドライブを実現します。
ボンドワイヤを一切使用しないパッケージと、最適化されたピン配置。	パッケージの寄生成分の最小化により、超高速スイッチングが可能になり、スイッチング損失を低減してヒートシンクを削減または排除しています。使いやすい PCB レイアウト。
GaN FET は、ゼロ逆回復 (第 3 象限動作) と非常に小さな入力容量 C _{ISS} を持っています。	インバータのようなハード スwitching 時のリングングを低減または排除して、EMI を低減します。オーバーシュートおよびアンダーシュートが非常に小さいため、同じ最大定格電圧で Si-FET よりも高い公称 DC リンク電圧が得られます。
優れた伝搬遅延マッチング (2ns FET)	3 相インバータ アプリケーションでスイッチング損失を大幅に低減し、位相電圧のデッドタイム歪みを除去するために、ハーフブリッジあたりのデッドバンドを超低レベルに抑えることができます。
ハイサイドとローサイドで独立したトランジスタロジック (TTL) 入力	3.3V MCU への直接 PWM インターフェイス
ブートストラップ電圧クランプおよび低電圧誤動作防止を備えた 5V シングルゲートドライバ電源	容易な電源管理。UVLO は、ゲートドライバが低電圧になった場合に、ハイサイドとローサイドの GaN FET を同時にシャットダウンします。
上面には露出した 2 個の GaN ダイ (SW と PGND) 底面には大きな PGND パッド	上面の熱抵抗の低減を実現。両側の冷却が可能。
SCP、OTD、ZVD を内蔵	外部保護回路のための BOM が減少。

2.3.3 AMC0106M05

AMC0106M05 と AMC0106M25 は、分流ベースの電流検出用に設計された、高精度の機能絶縁型 2 次デルタシグマ変調器です。M05 バージョンは $\pm 50\text{mV}$ の線形入力範囲をサポートしています。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。AMC0106M05 変調器は、低電圧アプリケーション向けに特化して設計されており、機能絶縁型であり、沿面距離と空間距離が 1mm の 2.7mm × 3.5mm の小型リードレスパッケージで提供されます。AMC0106Mxx 絶縁型変調器はパッケージサイズが小さいため、ロボットアプリケーションの小型フォームファクタモータードライブに不可欠な、小型の PCB レイアウトを実現できます。図 2-4 と表 2-3 に、機能ブロック図と主な特長を示します。

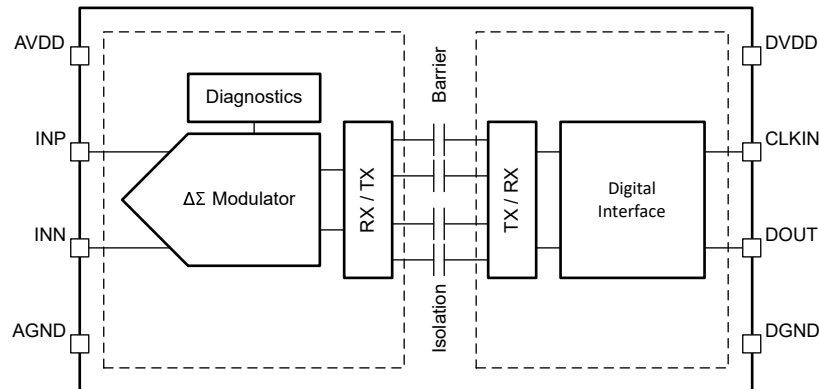


図 2-4. AMC0106M05 の機能ブロック図

表 2-3. AMC0106M05 の機能と特長

特長	利点
低ノイズ、2 次デルタ シグマ変調器	有効ビット数 (ENOB) が最大 14 の高精度電流センシングを実現
オフセットドリフト: $\pm 3\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (最大値)	温度に依存するキャリブレーションなしで、温度範囲全体にわたる高精度の電流検出を実現
高 CMTI: 150V/ns (最小値)	PWM スイッチング時や 100kHz 以上の PWM 周波数でも高精度の電流測定が可能
デジタル インターフェイス	高い EMC 耐性、測定精度に影響を与えない変調器と MCU 間の過渡グラウンド ノイズ
小型、2.7mm x 3.5mm リードレス パッケージ	PCB 面積を削減し、サーボドライブとロボットの小型化を実現

2.3.4 DP83826A

DP83826Ax は、小さく決定論的なレイテンシ、低消費電力、10BASE-Te および 100BASE-TX イーサネット プロトコルのサポートにより、リアルタイム産業用イーサネット システムの厳格な要件を満たすことができます。このデバイスは、高速なリンクアップ時間を達成するためのハードウェア ブートストラップ、高速リンクドロップ検出モード、システム内の他のモジュールをクロック同期させるための専用基準クロック出力 (CLKOUT) を備えています。一般的なイーサネットピン配置を使用する基本の標準イーサネット モードと、追加機能とハードウェア ブートストラップ構成によって標準イーサネットと複数の産業用イーサネット フィールドバス アプリケーションをサポートする拡張イーサネット モードという 2 つのモードに構成できます。機能ブロック図を図 2-5 に示し、主な特長と利点を表 2-4 に示します。

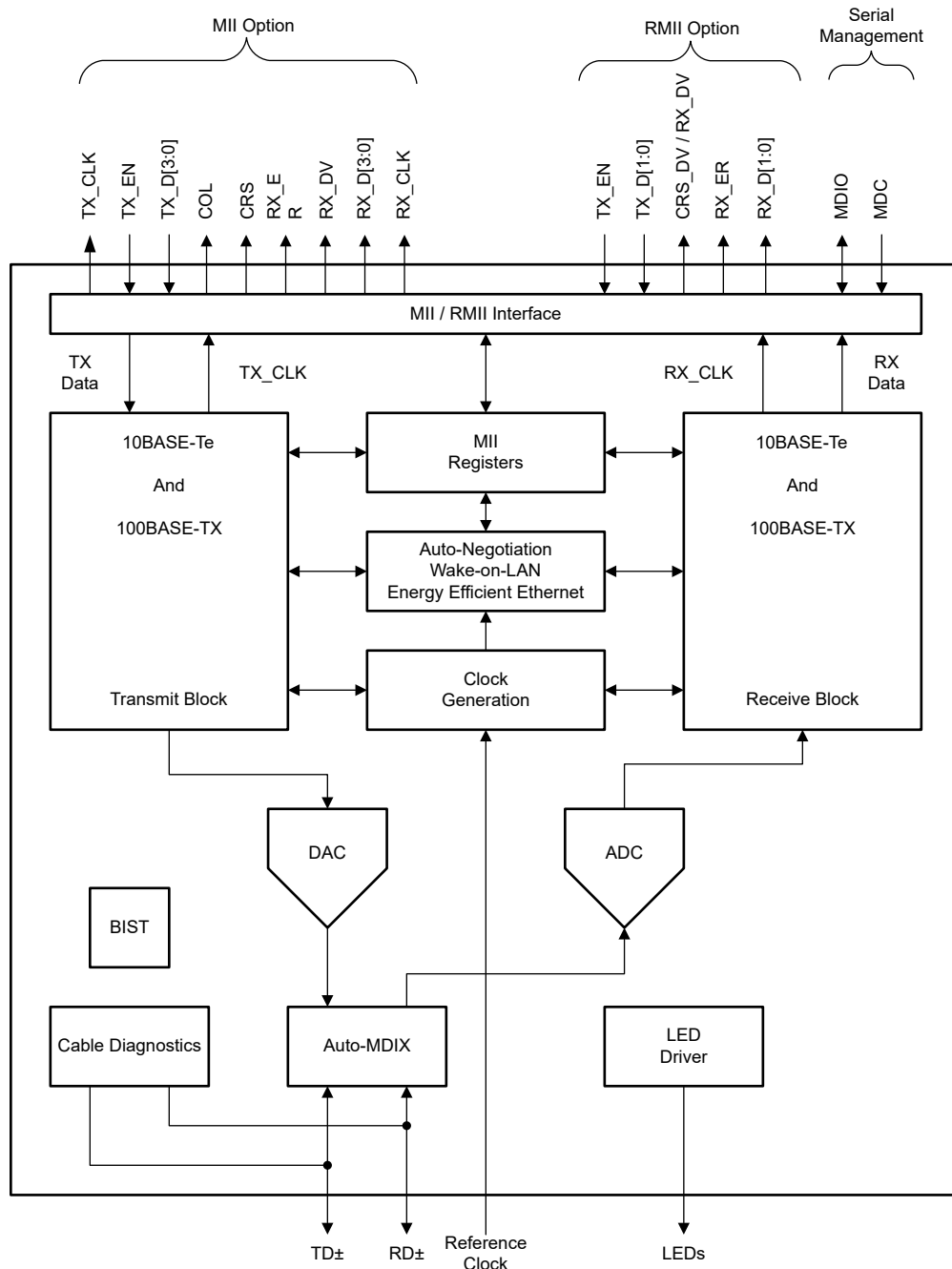


図 2-5. DP83826A の機能ブロック図

表 2-4. DP83826A の機能と特長

特長	利点
小さく決定論的なレイテンシ	EtherCAT などのリアルタイム産業用イーサネットシステムの厳格な要件を満たす
EMC 性能を強化する統合回路を内蔵し、IEEE 802.3 に準拠	堅牢で EMC 準拠のシステム設計が可能
低消費電力、プログラマブル省エネルギー モード	システムの電力要件を低減
1 つのデバイスで 2 つのピン モードを選択可能	ソフトウェアなしでフレキシブルなハードウェア ブートストラップを搭載し、容易に構成可能
拡張動作温度範囲	ロボットの関節アプリケーションなど高い周囲温度に対応

3 システム設計理論

このセクションでは、このリファレンス設計の設計ガイドラインについて説明します。

3.1 AM2612 モーター制御および通信インターフェイス

このデザインは、モーター制御および通信コントローラとして AM2612 ZNC (10mm × 10mm) パッケージを利用しています。モーター制御インターフェイスには以下が含まれています。

- 拡張パルス幅変調器 (ePWM) — この PWM ペリフェラルは、個別のリソースを持つ小型のシングルチャネル サブモジュールで構成されており、必要に応じてこれらを連携させてシステムを形成することができます。この設計では、3 相 GaN ドライバに ePWM0、ePWM1、ePWM2 を使用しています。各 ePWM サブモジュールには 2 つのチャネル A と B があり、設定可能なデッドバンドを持つ 2 つの相補型 PWM 信号を生成します。これら 3 つの PWM サブモジュールはすべて、250MHz の同じ時間ベース クロックを共有しており、互いに同期しています。各 ePWM モジュールには同期入力と出力があり、EtherCAT sync0 パルスや FSI RXTRIG など、複数のソースとイベントにリンクするように構成でき、通信と PWM の間のループを閉じることができます。
- シグマデルタフィルタ モジュール (SDFM) — この SDFM は電流測定専用設計された 4 チャネルのデジタルフィルタです。各入力チャネルは、独立したデルタシグマ変調器ビット ストリームを受信できます。ビット ストリームは、個別にプログラム可能な 4 つのデジタル デシメーションフィルタによって処理されます。この設計では、フィルタとして Sinc3 フィルタ タイプとオーバーサンプリング レート (OSR) 32 が選択されています。20MHz クロック (Sinc フィルタのデータレート) の場合、レイテンシは 4.8 μ s に等しくなります。SDFM クロックと SDM クロックは、それぞれ ePWM8A と ePWM8B によって生成されます。ePWM モジュールを使う利点は、実際のアプリケーションに応じてクロック位相と周波数を調整および設定できることです。このフィルタは、各 PWM 周期の中央に ePWM0 SOCA イベントによってトリガされ、サイクル中の電流の平均値を出力します。また、このフィルタセットには高速コンパレータ (2 次フィルタ) も含まれており、過電流および低電流監視とゼロ交差検出のためのデジタル スレッショルドを迅速に比較できます。
- PRU-ICSS GPIO モジュール 3 チャネル ペリフェラル インターフェイス — このインターフェイスは、HDSL、Tamagawa、EnDat 2.2、BiSS の各プロトコルを活用した動作をサポートしています。このインターフェイスは、2 線式と 4 線式の両方のシリアル RS-485 通信に対応しています。各チャネルの範囲は 100kHz ~ 16MHz です。データ FIFO サイズは送信用で 32 ビット、受信で 4 ビットです。受信入力のシフト サイズとオーバーサンプリングは設定できます。このデザインでは、レデューサ ギアボックス後のモーター回転角度と絶対位置フィードバック用に 2 つの BiSS エンコーダが実装されています。さらに、2 つの PRU-ICSS インスタンスを使用して、これら 2 つのエンコーダのデータ デコードを行います。位置フィードバックは、ePWM0 SOCA タイミングと一致する ePWM3 比較イベント C によってトリガされます。
- PRU-ICSS リアルタイム メディア独立インターフェイス (MII_RT) モジュール — このモジュールは、PRU が最大 2 つの MII ポートにアクセスして制御するためのプログラマブル I/O インターフェイスを提供します。各ポートは最大 64 バイトの 2 レベル FIFO を備えており、自動転送、オンザフライ、ピンポン処理などのさまざまなユース ケースをサポートします。また、このモジュールは TX パスと RX パスの両方でリンク検出機能と巡回冗長性検査 (CRC) 機能を備えています。決定論的命命令セットの場合、100Mbps リンクでの最小レイテンシはわずか 3ns です。

図 3-1 に TIDA-010979 のモーター制御および通信インターフェイスを示し、図 3-2 にモーター制御の構成を示します。

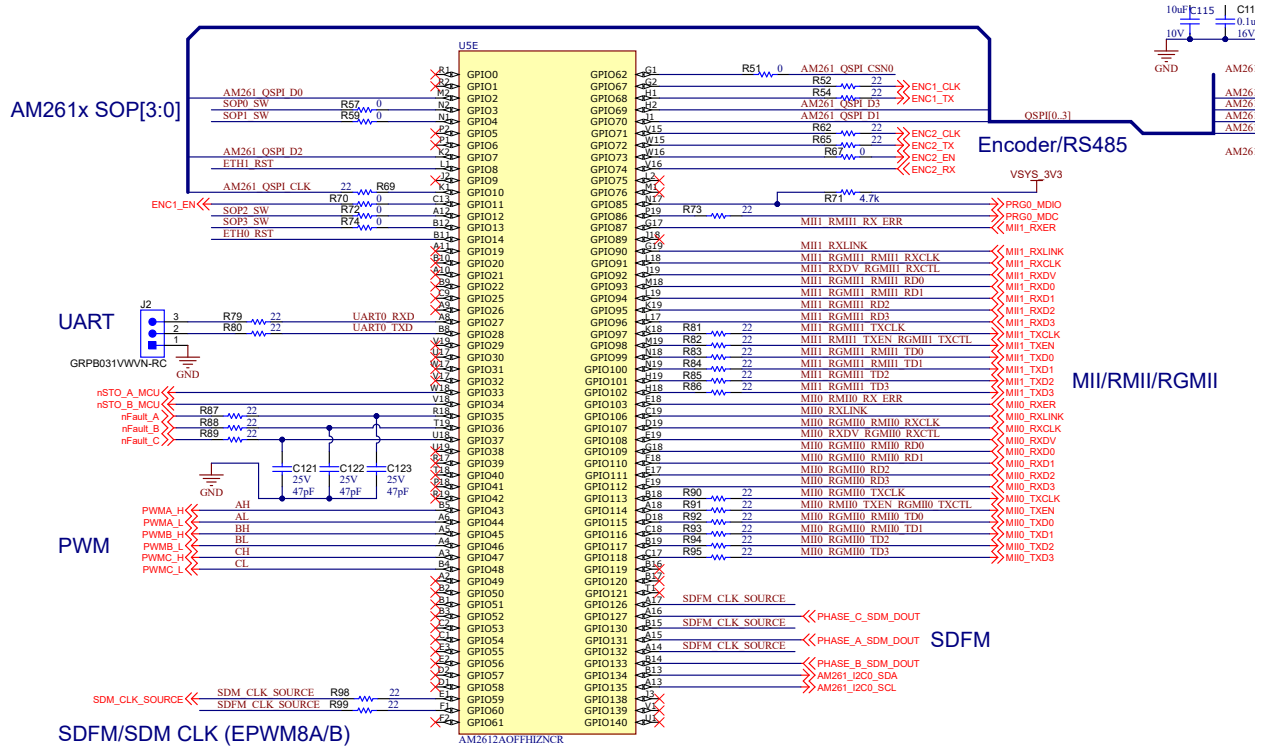


図 3-1. TIDA-010979 – AM2612 のモーター制御および通信インターフェイス

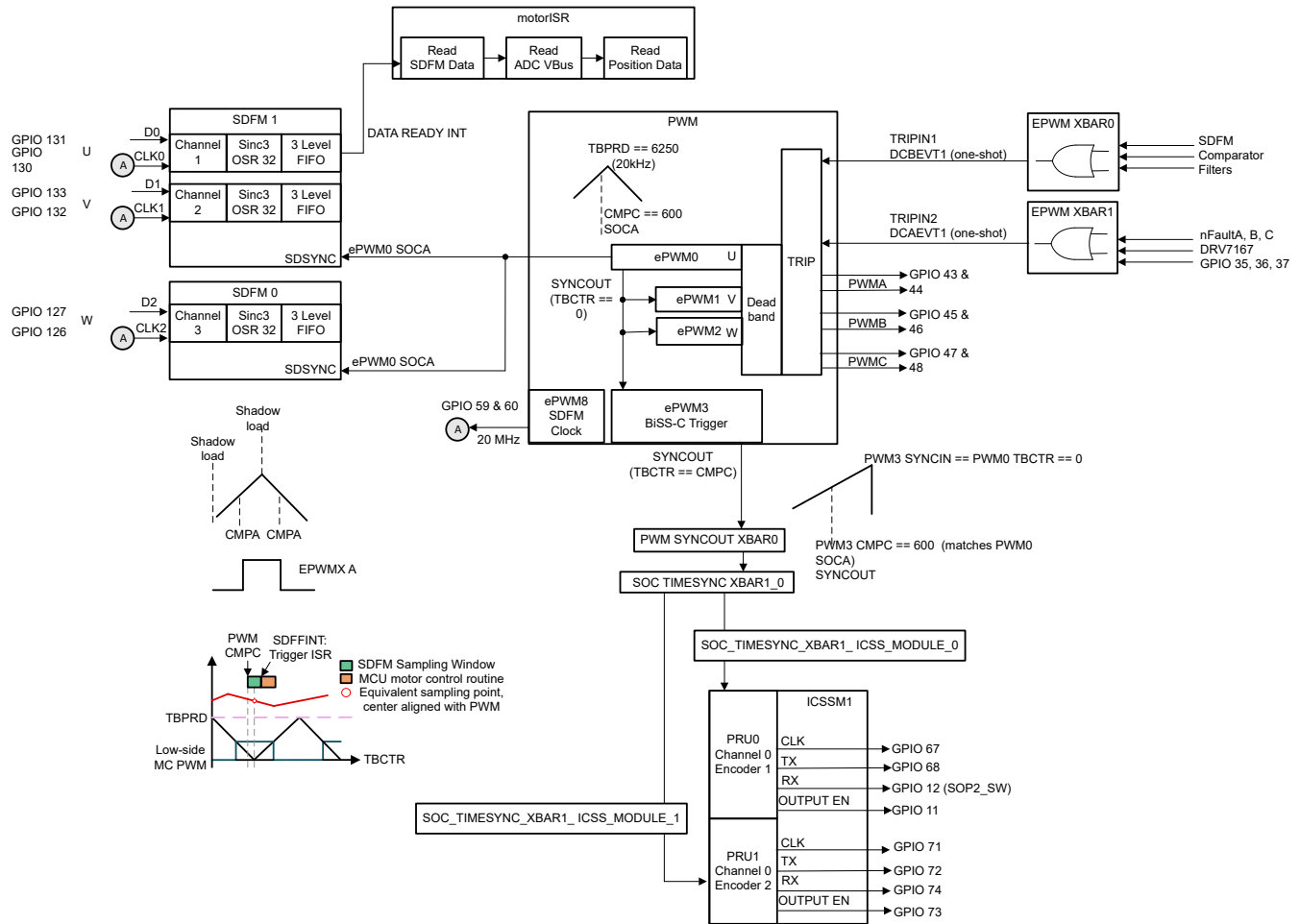


図 3-2. TIDA-010979 モーター制御構成

3.2 DC リンクとグラウンドの構成

公称 48V の DC 入力電圧は、17 個の 10 μ F セラミックコンデンサでバッファされ、合計 170 μ F の DC バス容量となります。PCB では、電源グラウンド (PGND) とロジックグラウンドまたはアナロググラウンド (GND) という 2 つの独立したグラウンドプレーンが用いられています。電源グラウ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、両方のグラウンドプレーンはスター構成でネットタイを介して接続されています。図 3-3 に、DC リンクのデカップリングとグラウンド構成の回路図を示します。

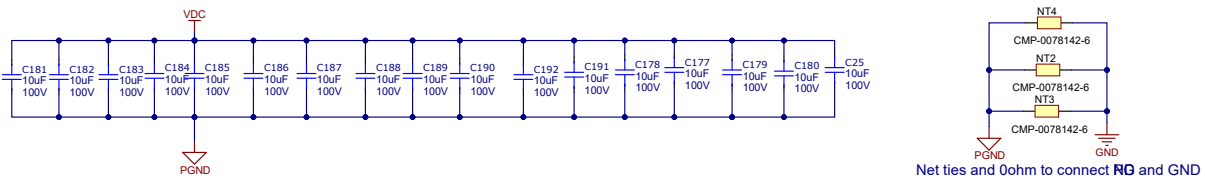


図 3-3. DC リンクのデカップリングおよびグラウンド (GND) の構成

3.4 機能絶縁型デルタ シグマ変調器 AMC0106M05 を用いたインライン シャント高精度位相電流検出

このリファレンス設計では、高精度で小型フォーム ファクタの位相電流検出を実現するために、デルタシグマ変調器を用いた電流検出技術を採用し、1mΩ インライン シャントを使用して位相電流を測定します。3 相電流は、小型のリードレスパッケージに封止した機能絶縁型変調器 AMC0106M05 を使用して測定し、AM2612 マイコンに内蔵されたデルタシグマ デジタル フィルタに送信します。

図 3-5 は、±50mV の線形入力電圧範囲で、1mΩ、3W 分路 (R187) の機能絶縁変調器 AMC0106M05 (U28) を使用した、相電流検出サブシステムの回路図を示しています。1mΩ の分流値により線形入力範囲は ±50A に決定されます。AMC0106M05 の入力クリッピング範囲は ±64mV なので、最大電流範囲は ±64A です。35A_{RMS} における分流の消費電力は 1.25W です。

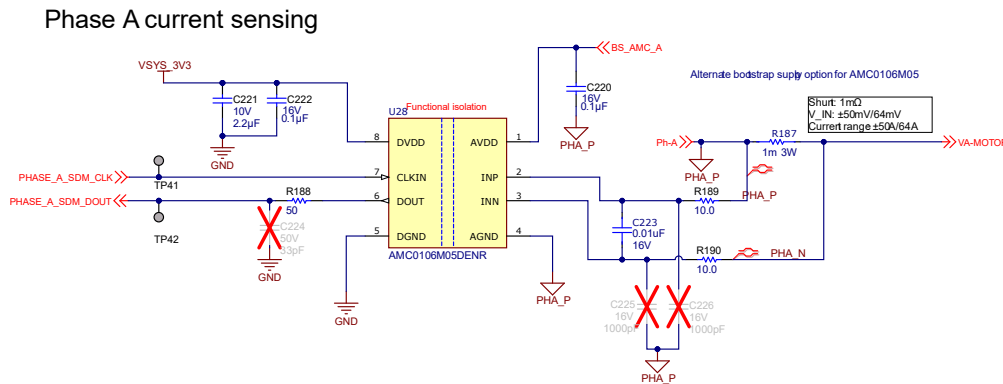


図 3-5. 位相 A 用 AMC0106M05 を用いたインライン位相電流センスの回路図

絶縁変調器の前の差動アンチエイリアシング ローパスフィルタ (R189 = 10Ω, R190 = 10Ω, C223 = 10nF) のカットオフ周波数は 795kHz で、信号経路の信号/ノイズ比性能の向上に役立ちます。ローパスフィルタの目的は、高周波入力ノイズを測定に必要なノイズ レベルを下回るように減衰させることです。入力フィルタがない場合、サンプリング周波数に近いノイズ、またはサンプリング周波数の倍数が、デルタシグマ変調器によって低周波にエイリアスされ、デジタル ローパスフィルタを通過します。コンデンサ C225 = 1nF および C226 = 1nF はオプションで、10MHz を超える周波数での同相入力電圧除去を向上させます。C225 と C226 のサイズは、C223 の 10 分の 1 です。最高の性能を得るには、C225 と C226 の値が 5% 以上優れていることを確認してください。C225 と C226 が一致しないと、同相過渡中に差動入力誤差を引き起こします。NP0 タイプのコンデンサは温度ドリフトが低く、同相フィルタリングに適しています。アナログ電源 AVDD は、100nF のコンデンサ C220 で減結合されます。

AVDD は、C205 = 4.7µF の DRV7167A 内蔵ブートストラップ電源から供給されます。AMC0106M05 は通常 AVDD 電源から 6.6mA を取得します。この構成では、最大連続デューティ サイクルが約 95% で、10kHz ~ 100kHz の PWM 周波数で動作します。『48V ロボットサーボドライブ向け、高分解能、小型フォーム ファクタの位相電流検出』アプリケーションノートにあるテスト結果も参照してください。

デジタル電源 DVDD は、コンデンサ C221 = 2.2µF および C222 = 100nF でデカップリングされます。AMC0106M05 DOUT ピンに 50Ω の直列ライン終端抵抗 R188 を接続すると、シグナル インテグリティが向上します。オプションのコンデンサ C224 = 33pF を使用すると、変調器の出力ビットストリーム信号のスルー レートが低減され、EMI をさらに低減できます。絶縁変調器からマイコンへのデジタル インターフェイスの改善については、『モータードライブにおける絶縁型デルタシグマ変調器によるシグナル インテグリティの向上』と、『マイコンへの絶縁型変調器のデジタル インターフェイスによるクロック エッジ遅延補償』アプリケーション ノートも参照してください。

3.5 システムのパワー マネージメント

電源ツリーを、図 3-6 に示します。入力電圧範囲の広い DC/DC 降圧コンバータが 5V レールを生成します。その後、2 つの独立した電源モジュールが 5V から 3.3V と 1.8V の 2 つのレールを生成します。3.3V は、マイコンのすべての IO 電圧と、論理ゲート、変調器、トランシーバなどの他のアナログ部分に電源を供給します。1.8V は AM2612 のクロック入力用の電圧シフタを供給し、もう 1 つのオプションとして 1.8V フラッシュに電源を供給することもできます。別のパワー モジュールは、3.3V から 1.25V レールを生成し、AM2612 のコア電圧を供給します。

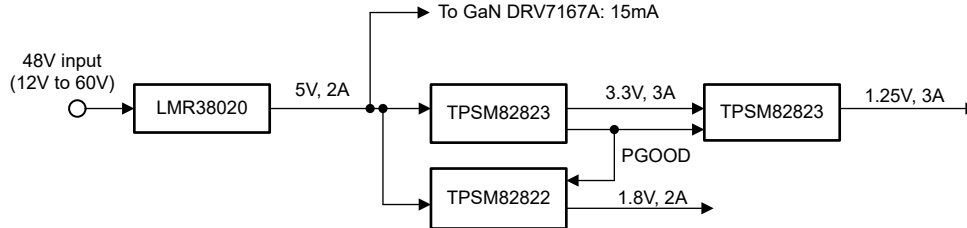


図 3-6. TIDA-010979 システム パワー ツリー

LMR38020 DC/DC 降圧コンバータは 12V ~ 60V の入力電圧範囲で動作します。出力電圧は 5V に達します。DC/DC 降圧コンバータのフィードバック回路は、最小の出力電圧リップルを達成し、2A 以上の出力電流を供給します。サイズを最小化するために、スイッチング周波数は 617kHz で動作し、必要なのは 22 μ H インダクタのみです。シミュレーションによる出力電流が 0.1A を超えると、出力リップルの測定値は 15mV 未満になります。5V レールは、ダウンストリームの電源レールに電力を供給し、GaN DRV7167A デバイスにロジック電力を供給します。

3.3V レールと 1.25V レールの場合、2mm \times 2.5mm の超小型パッケージの独立したパワー モジュール TPSM82823 が 3A の出力電流要件を満たします。このパワー モジュールには同期整流降圧コンバータとインダクタが組み込まれているため、設計の簡素化、外付け部品の低減、PCB 面積の削減が可能です。

3.3V レールと同様に、TPSM82822 によって固定出力アプリケーションで生成される 1.8V レールにより、外付け部品数が減少します。コントローラ マイコン AM2612 には、3.3V (VDDS33、VDDA33)、1.8V (VDDS1833_FLASH0、VDDS1833_FLASH1)、および 1.2V (VDD、VDDARx) の外部電源を供給する必要があります。マイコン AM2612 に 3.3V フラッシュを使用する場合、電源シーケンス要件はありません。ただし、1.8V フラッシュを使用する場合は、3.3V (VDDS33、VDDA33) の立ち上げから少なくとも 50 μ s 遅らせて、1.2V および 1.8V レールを立ち上げることを推奨します。このリファレンス デザインは、テクニカルリファレンス マニュアルの推奨に従い、3.3V パワー モジュールによって生成されたパワー グッド信号を利用して 1.2V と 1.8V のレールを有効にします。このリファレンス デザインは 3.3V フラッシュを使用します。

3.6 機能安全コンセプト

図 3-7 に、このリファレンス デザインの機能安全コンセプトを示します。安全目標は、安全規格 ISO13849-1 に準拠したカテゴリ 3、性能 D、または性能 E です。この安全コンセプトは、通知機関により評価されておらず、モーター制御システム内の安全チェーンを紹介するための例にすぎません。また、このデザインには、電源レール用の冗長チャネル (安全な両チャネル用のデュアル 3.3V)、電源をオフにする安全なスイッチ、診断回路などの追加回路は実装されていません。

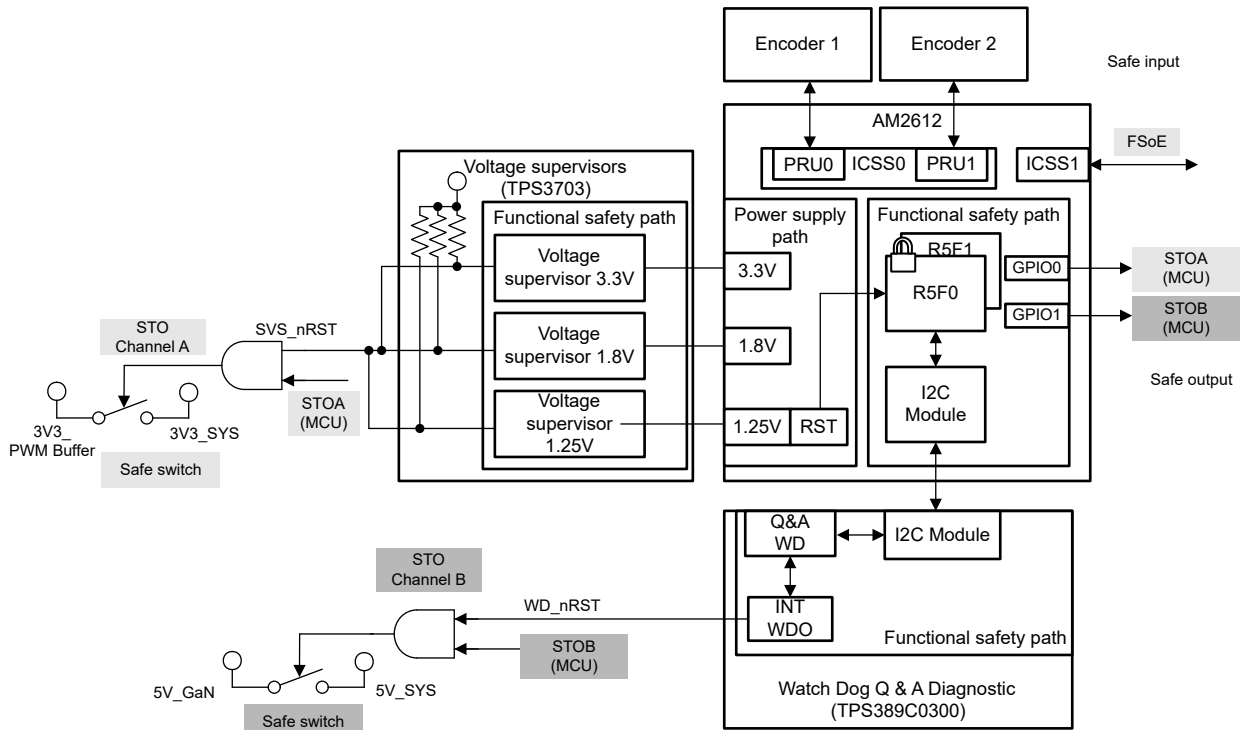


図 3-7. TIDA-010979 機能安全コンセプト

安全チェーンには、安全入力、セーフ ロジック (マイコン)、および安全出力が含まれます。安全入力は、さまざまな要件に応じて、デュアルチャネル エンコーダまたは安全なイーサネットから取得できます。安全データはブラック チャネルとして送信され、セーフ マイコンが安全データのクロス監視を実行します。セーフ マイコンがトリガ コマンドを受信するか、また故障が診断回路によって検出されると、デュアルチャネル安全出力がセーフ スイッチをオフにして安全機能をトリガします。システムは、事前定義された安全状態に移行します。カテゴリ 3 の性能 D 安全ターゲットを満たすために、電源診断が危険な故障を検出する方法を、表 3-1 に示します。

表 3-1. 電源装置の故障および診断

フォルトタイプ	セーフ マイコン	電源電圧スーパーバイザ (SVS)	電源	ウォッチドッグ Q&A
電源の過電圧 (OV)	危険な状態のマイコン	エラーを検出し、安全状態をトリガします	電源が機能していません	Q&A は、マイコンの誤動作 (ロジックまたはタイミング) を検出し、安全状態をトリガします
電源の低電圧 (UV)	マイコンのブラウンアウトトリガと、安全状態のトリガ	エラーを検出し、安全状態をトリガします	電源が機能していません	Q&A は、マイコンの誤動作 (ロジックまたはタイミング) を検出し、安全状態をトリガします
ウォッチドッグ (WD) Q&A の失敗	Q&A は、マイコンの誤動作 (ロジックまたはタイミング) を検出し、安全状態をトリガします	SVS による OV と UV の検出	消費電力がマイコンの仕様範囲内	Q&A が機能していません
SVS が OV に失敗しました	Q&A は、マイコンの誤動作 (ロジックまたはタイミング) を検出し、安全状態をトリガします	SVS が機能していません	消費電力がマイコンの仕様範囲内	Q&A は、マイコンの誤動作 (ロジックまたはタイミング) を検出し、安全状態をトリガします
SVS が UV に失敗しました	マイコンのブラウンアウトトリガと、安全状態のトリガ	SVS が機能していません	消費電力がマイコンの仕様範囲内	Q&A は、マイコンの誤動作 (ロジックまたはタイミング) を検出し、安全状態をトリガします

3.7 イーサネット物理層

このデザインは、2 個の DP83826A イーサネット PHY を活用して、EtherCAT サブデバイス アプリケーションでのデジタイチェーン接続を可能にします。図 3-8 に、トランスとコネクタを備えた PHY 回路の一例を示します。

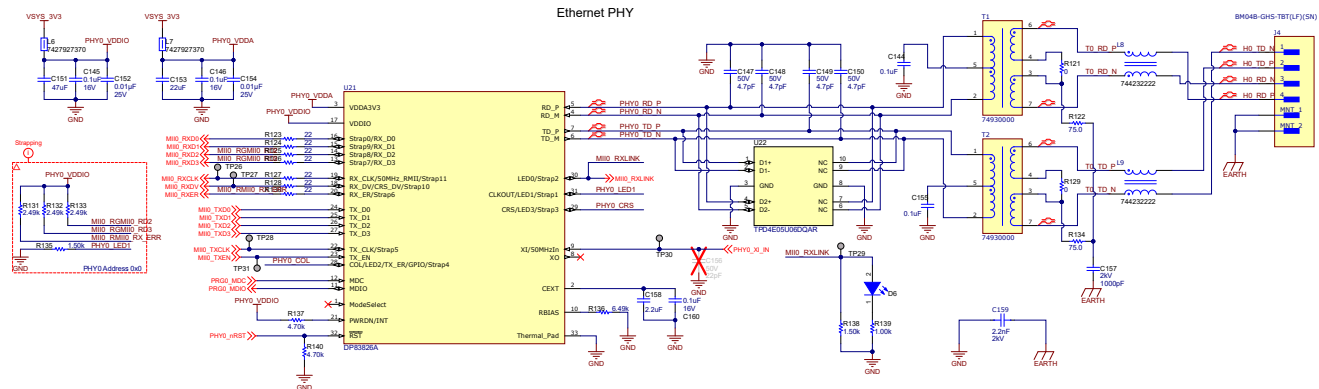


図 3-8. イーサネット PHY0 の回路図

U21 のピン 1 をフローティングにすることで拡張モードが選択され、EtherCAT を使用するためのハードウェア ストラップ構成が有効になります。R131、R132、R133、R135 はストラップ抵抗です。詳細については、『EtherCAT® アプリケーションで DP83826 を使用する方法と理由』アプリケーション ノートを参照してください。アナログ電源 (VDDA3V3) とデジタル IO 電源 (VDDIO) はどちらも、フェライト ビーズ L6 と L7 によってデカップリングされています。メディア独立インターフェイス (MII) は、PHY とメディア アクセス制御 (MAC) 層の間を接続するためのイーサネット信号路のレイテンシを最小化するために使用されています。ESD ダイオード U22 をメディア依存インターフェイス (MDI) の差動ラインに接続して、ノイズを抑制します。PCB 面積を低減するため、統合 RJ45 ポートの代わりにディスクリートトランス (T1、T2)、コモン モードチョーク (L8、L9)、コネクタ (J4) が実装されています。また、R122、R134、C157 がボブ スミス終端として接続され、ノイズを低減します。

3.8 位置フィードバック インターフェイス

このデザインは、4 個の SN65HVD75 RS-485 トランシーバを活用して、BiSS-C プロトコルを使用して 2 つの位置エンコーダからフィードバックを提供します。20 ビットの分解能を持つエンコーダ 1 は、FOC ループのモーター制御に使用されるモーター回転子の絶対位置データに関するフィードバックを提供します。エンコーダ 2 は 19 ビットの分解能で、エンドユーザーに絶対位置データをフィードバックし、ギアボックスレデューサの後に配置されます。クロック信号とデータ信号を含む差動ラインは、位置ボードに接続します。トランシーバからの CMOS 信号は、エンコーダの絶対位置フィードバック用に特別に設計された 3 チャンネル ペリフェラル インターフェイス モードを使用して PRU-ICSS IO に直接接続されます。図 3-9 に、これら 2 つの位置フィードバック インターフェイスの回路図を示します。

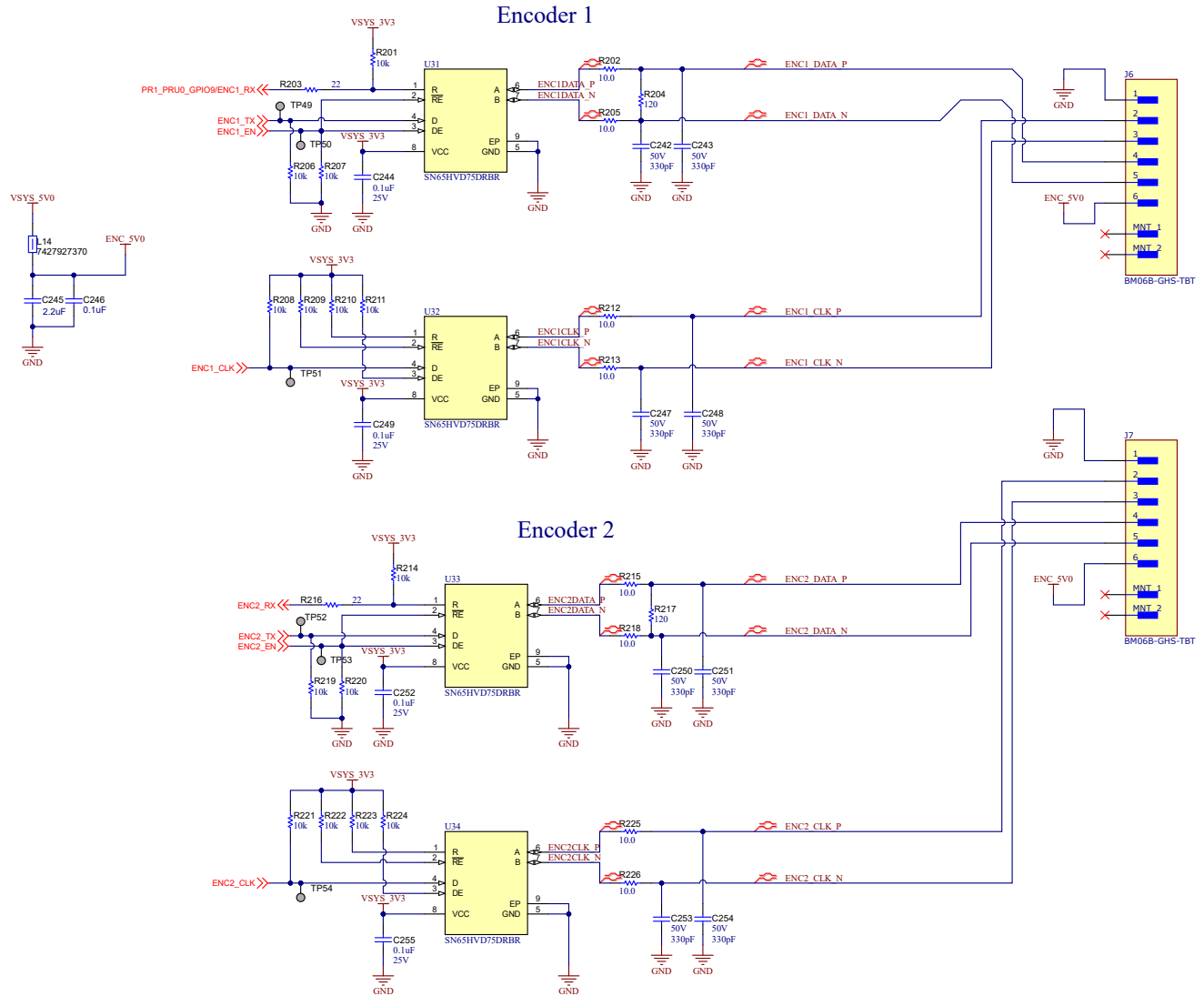


図 3-9. 位置フィードバック エンコーダ インターフェイスの回路図

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

4.1.1 TIDA-010979 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。

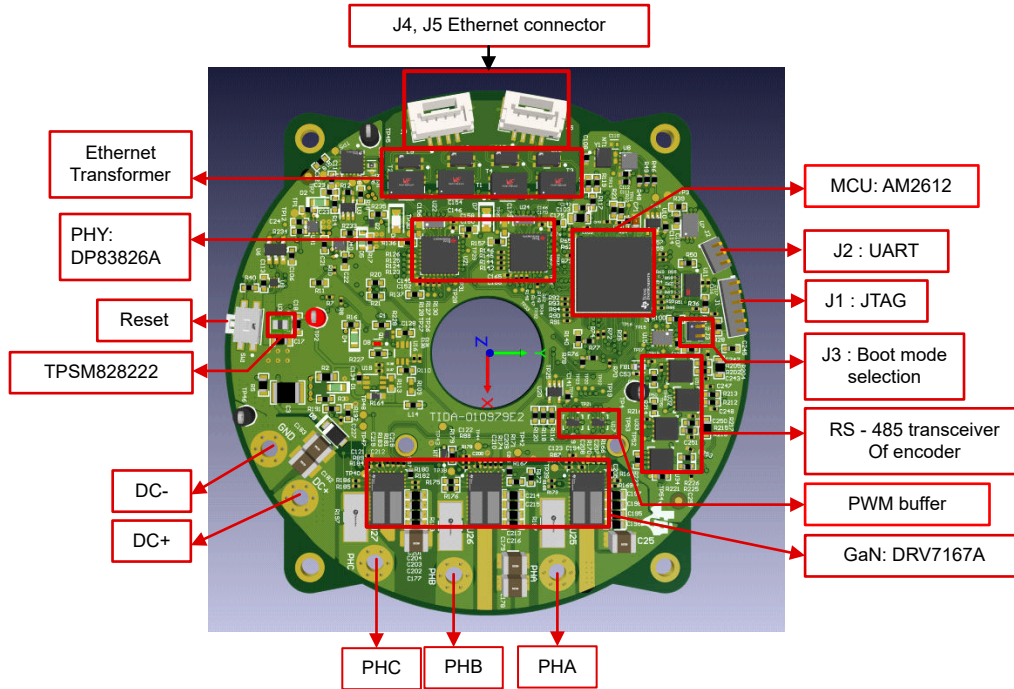


図 4-1. TIDA-010979 PCB の上面図

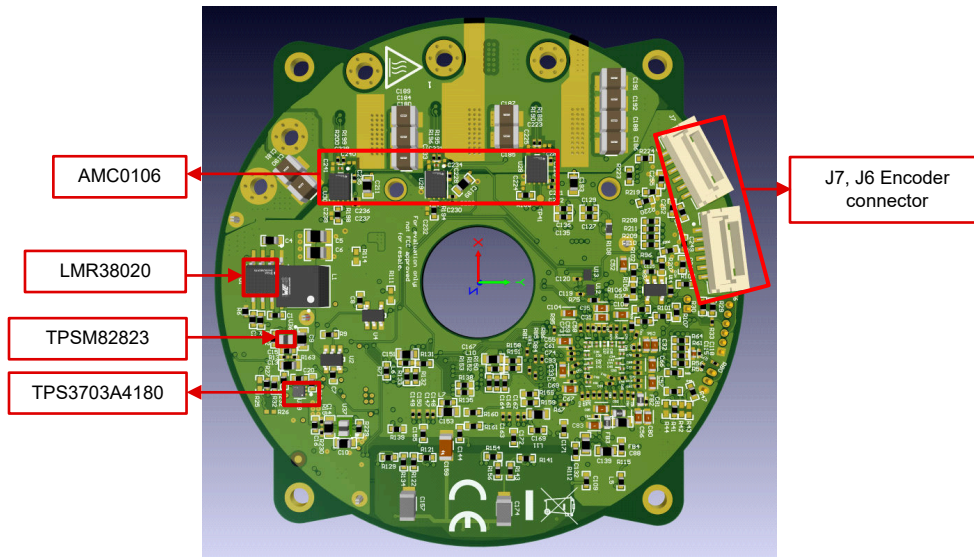


図 4-2. TIDA-010979 PCB の底面図

4.1.2 TIDA-010979 のハードウェア設定

TIDA-010979 ボードを有効にするには、DC+ と DC- のスルーホールの間に DC 電圧 48V (または、モーター定格に応じてそれ以下の電圧) を印加します。スルーホールを介して 3 本のモーター位相電力ケーブルを PHA、PHB、PHC に接続します。

J1 は、ソフトウェア コード デバッグ用の JTAG コネクタとして機能します。XDS110 JTAG デバッグプローブを J1 に接続します。J2 は UART コネクタの役割を担います。また、XDS110 AUX ピンに接続して端末情報を印刷する、または UART 通信経路のフラッシュへの書き込みなどのデータ送信をすることもできます。

J3 は、ブートモード選択ジャンパとして機能します。J3 を短絡すると、OPSI (4S)、すなわちクワッド読み取りモードがマイコンブートモードとしてイネーブルになります。J3 を開くと、UART モードはマイコンブートモードとしてイネーブルになります。AM2612 ブートモードの詳細については、『AM261x MCU+ SDK 11.01.00 ユーザーガイド』の評価基板 (EVM) セットアップも参照してください。

J6 はエンコーダ 1 のコネクタとして機能し、モーターローテータの位置情報のフィードバックを行います。J7 はエンコーダ 2 のコネクタとして機能し、ギアボックスレデューサの位置情報をフィードバックします。J4 と J5 はイーサネットコネクタとして機能し、ダイジーチェーンアプリケーションで 1 つのポート入力および 1 つのポート出力として機能できます。TIDA-010979 ハードウェア設定の概要を、[図 4-3](#) に示します。

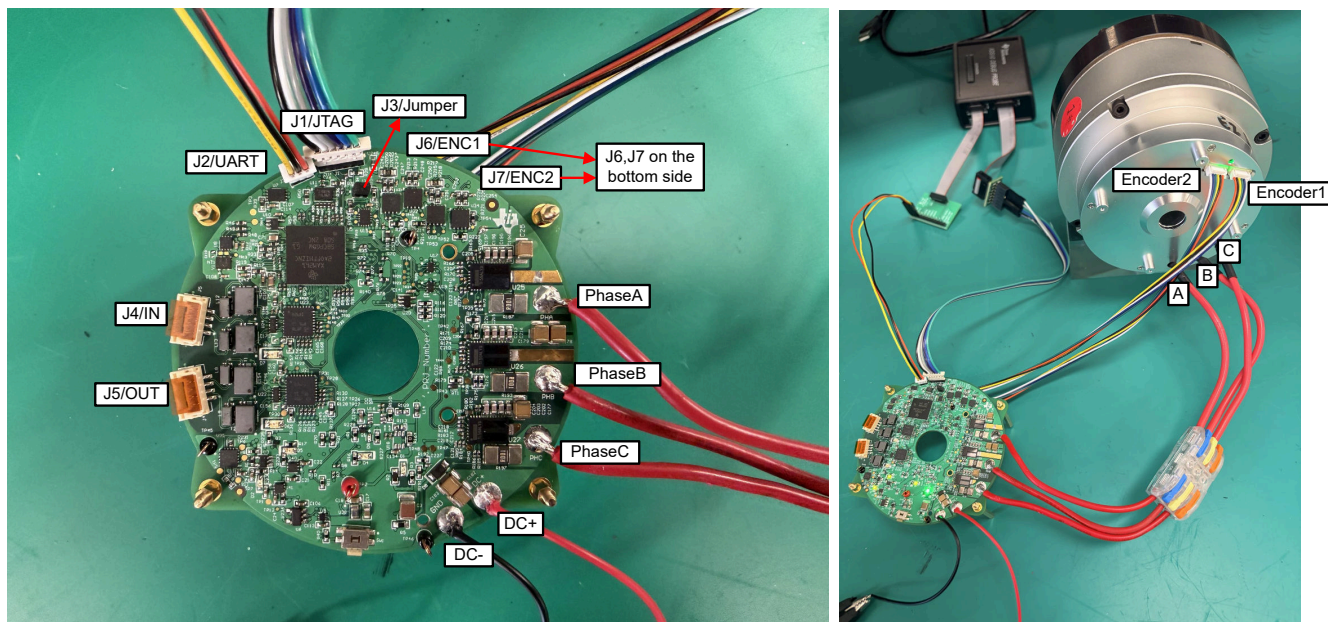


図 4-3. TIDA-010979 のハードウェア設定の概要

4.2 ソフトウェア要件

このリファレンス デザインを検証するため、AM2612 ZNC パッケージ用に TI の社内テストソフトウェアが開発されています。AM2612 ソフトウェアのサポートについては、[MCU-PLUS-SDK-AM261X ソフトウェア開発キット \(SDK\)](#)、[AM261x 用のモーター制御 SDK](#)、[IND-COMMS-SDK ソフトウェア開発キット \(SDK\)](#) ツール ページ、[Arm ベースのマイコンフォーラム - Arm ベース マイコン - TI E2E サポートフォーラム \(Sitara マイコン向け\)](#) を参照してください。

4.3 テスト設定

表 4-1 に、主な試験装置を示します。特定のテストのためのセットアップの説明と画像は、対応するテスト結果のセクションに示します。

表 4-1. 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
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	TESTO 865
可変電源 (10A)	ITECH IT6724H
可変電源 (20A)	ITECH M3902C
低電圧サーボ モーター (72V、21A)	7H2207124422

4.4 テスト結果

4.4.1 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

このテストの重点は、5V、3.3V、1.8V、1.25V レールを含むオンボード電源の電圧およびシーケンスを検証することでした。

図 4-4 と 図 4-5 に、それぞれパワーアップ波形とパワーダウン波形を示します。

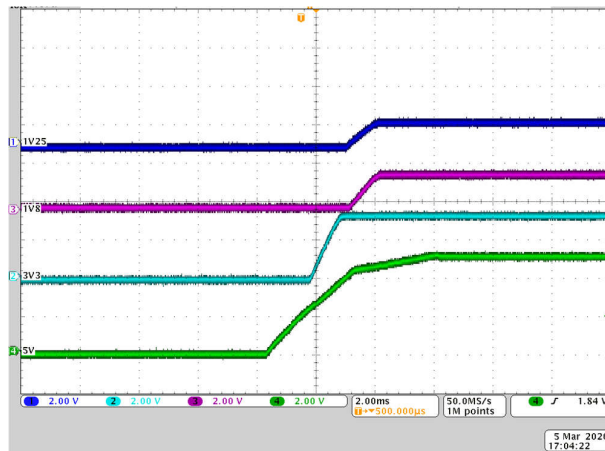


図 4-4. TIDA-010979 システムのパワーアップ

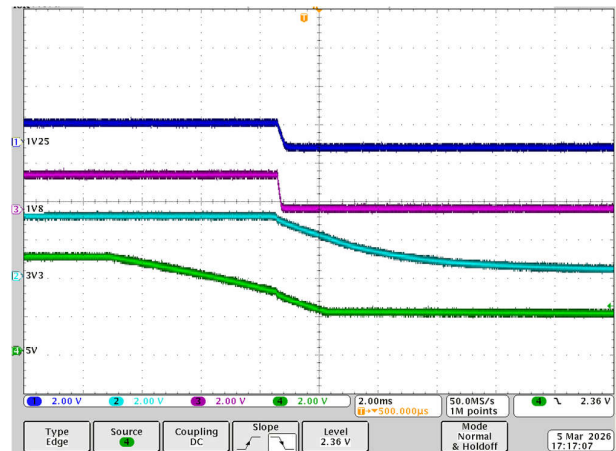


図 4-5. TIDA-010979 システムのパワーダウン

4.4.2 ハーフブリッジ GaN モータードライバの電力段スイッチ ノード

図 4-6 から 図 4-9 に、スイッチング過渡電圧、伝搬遅延、および立ち上がりと立ち下りの両方のエッジについて設定可能なスルーレート (20% ~ 80%) の概要を示します。出力位相電流は $10A_{RMS}$ および 80kHz PWM 周波数で設定可能です。0Ω の制御抵抗を実装した場合、オーバーシュート電圧は約 14V です。

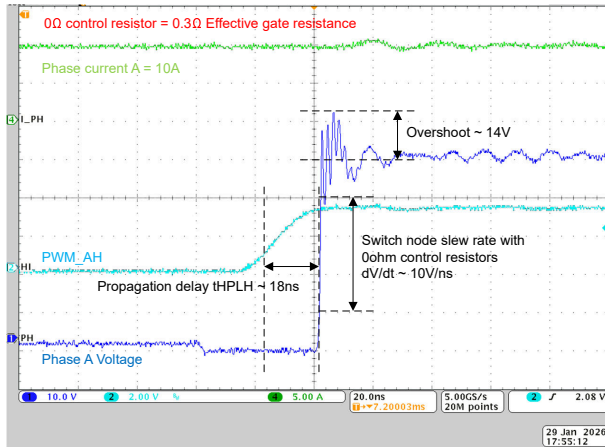


図 4-6. 0Ω の制御抵抗による立ち上がりスルーレート

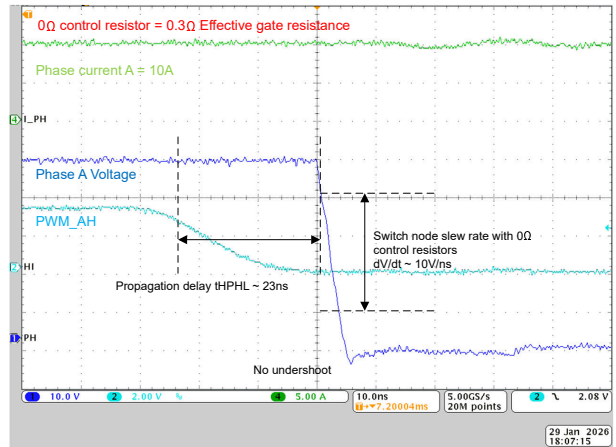


図 4-7. 0Ω の制御抵抗による立ち下りスルーレート

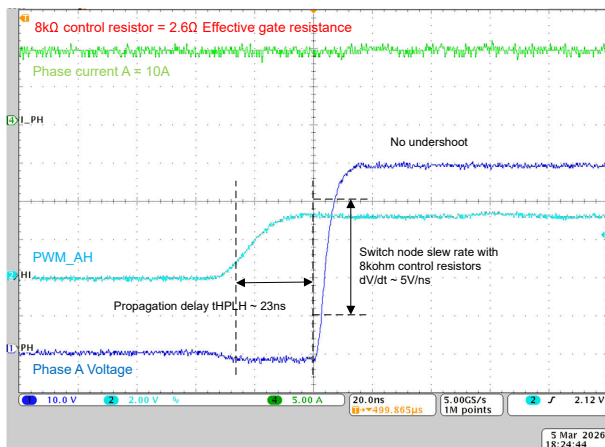


図 4-8. 8kΩ の制御抵抗による立ち上がりスルーレート

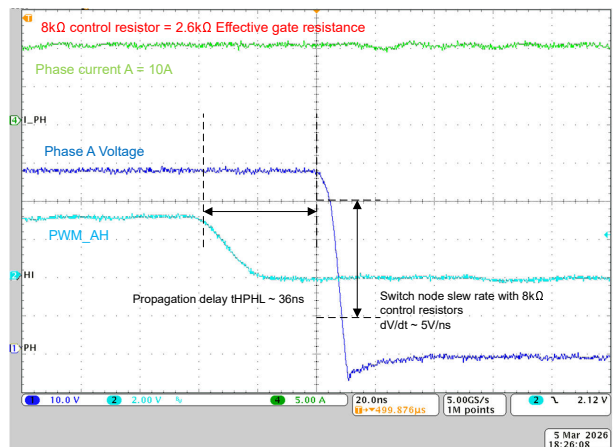


図 4-9. 8kΩ の制御抵抗による立ち下りスルーレート

4.4.3 電力段の熱測定

熱測定テストは、25°C のラボ温度で実施しています。TIDA-010979 ボードは、48V DC 電源で動作し、最大 72V、21A の負荷として機能する大電力サーボ モーターに接続されています。モーターにはダイナモメータで高負荷を供給しています。PWM キャリア周波数は 40kHz ~ 80kHz で動作します。デッド バンドは 40ns で動作します。モーター速度は 80Hz で動作します。図 4-10 に熱テスト設定を示します。すべての熱テストでは、ヒートシンクもファンも使用していないため、TIDA-010979 PCB の自然対流のみが適用されました。

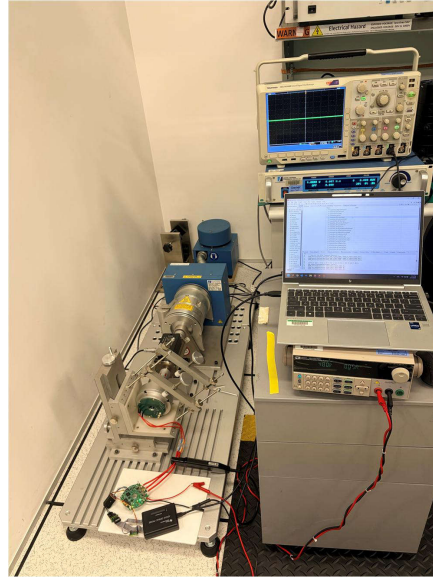


図 4-10. 熱測定テスト設定

DRV7167A は上面でダイが露出しているため、DRV7167A のケース温度はダイの温度に非常に近くなります。推奨される接合部温度は最大 125°C です。このテストでは、熱平衡状態に達した時に、GaN デバイスは PWM 周波数 20kHz、位相電流 16A_{RMS} で 115°C、PWM 周波数 80kHz、位相電流 14A_{RMS} で 118°C に達しました。図 4-11 は 20kHz PWM、16A_{RMS} 時の TIDA-010979 の熱画像、図 4-12 は、80kHz PWM、14A_{RMS} 時の TIDA-010979 の熱画像を示しています。両方のテスト条件の温度上昇曲線を、図 4-13 に示します。2 分以内の最大位相電流は、20kHz の PWM キャリア周波数で約 17.4A_{RMS} です。48V、17A_{RMS} で、力率が 1 に等しいと仮定した場合、インバータ出力のピーク電力は 1kW に達します。

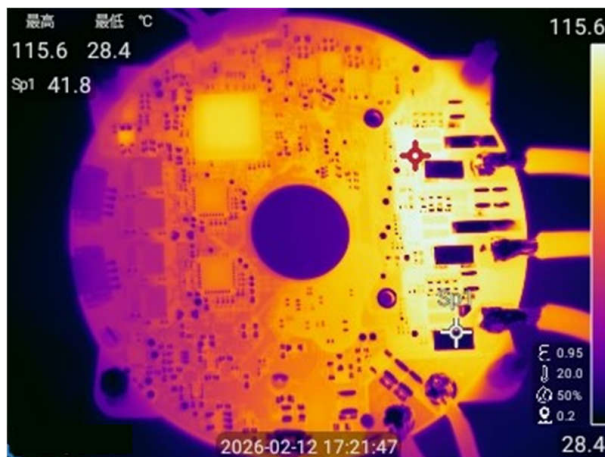


図 4-11. 20kHz PWM、16A_{RMS} 出力時における DRV7167 の熱画像

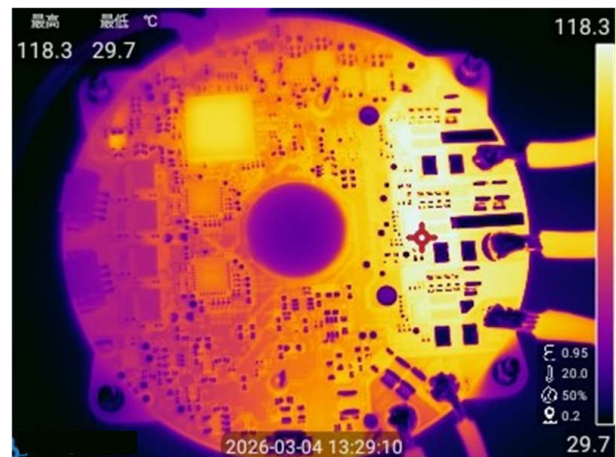


図 4-12. 80kHz PWM、14A_{RMS} 出力時における DRV7167 の熱画像

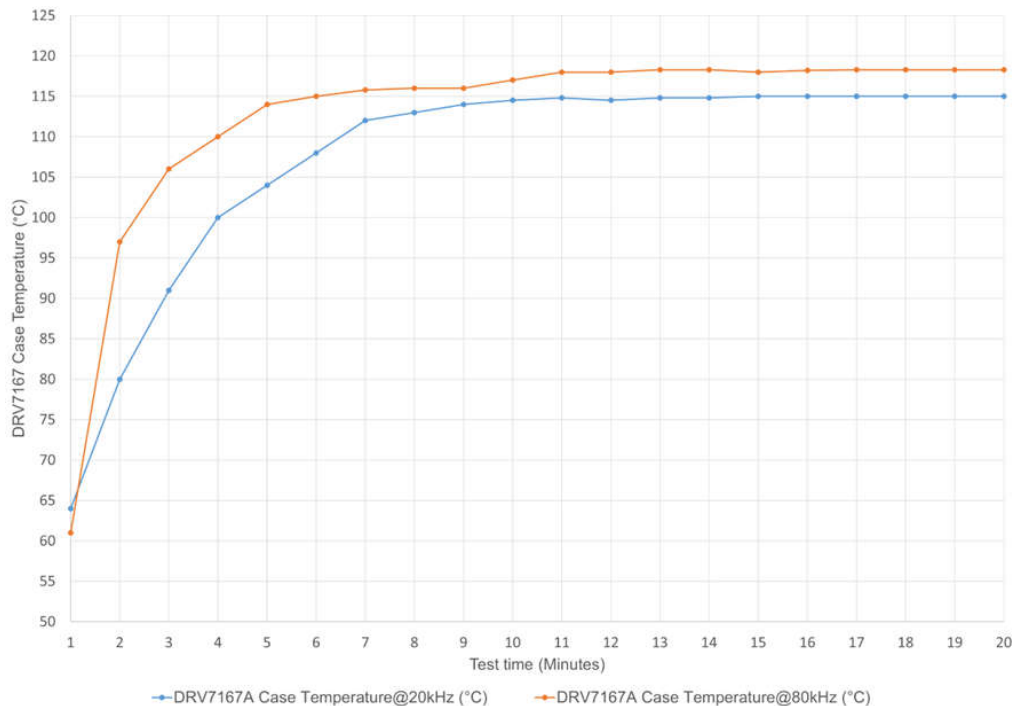


図 4-13. DRV7167A の温度上昇曲線

4.4.4 位相電流検出と位置フィードバック

AMC0106M05 変調器のクロック入力 は 1 個の EPWM モジュールから駆動され、変調器の出力データビットストリームは 32 ~ 256 のオーバーサンプリング比 (OSR) で実行される Sinc3 フィルタを使用して AM2612 マイコン上でデシメーションされます。機能絶縁型変調器 AMC0106M05 を使用した相電流検出の詳細なテスト結果については、『[48V ロボットサーボドライブ向け、高分解能、小型フォームファクタの位相電流検出](#)』アプリケーション ノートを参照してください。図 4-14 に、Q 軸のリファレンス電流が 20A に設定されているときの位相 A と位相 B の電流波形を示します。テスト結果から、ピーク電流がソフトウェアで提供されるリファレンス電流とよく一致していることを確認できます。

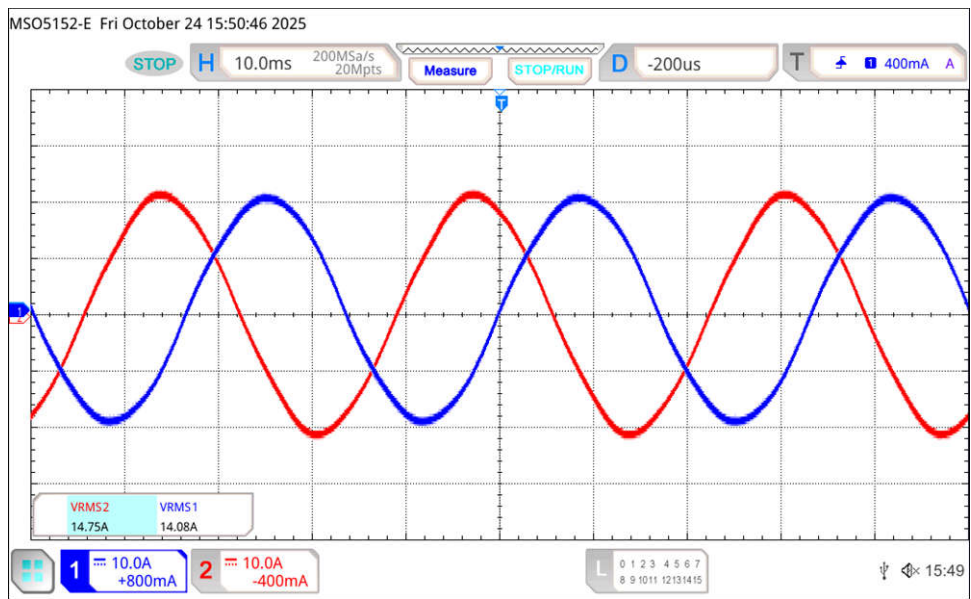


図 4-14. ピーク 20A 時の位相電流

モーターの機械的な回転角度と、FOC 制御ループに使用される電氣的な角度を表すエンコーダ 1 から収集した位置データを、[図 4-15](#) に示します。電気角は、モーターの機械角にモーターの極ペア数を掛けた値に等しくなります。EYOU モーターには 8 つの極ペアがあります。

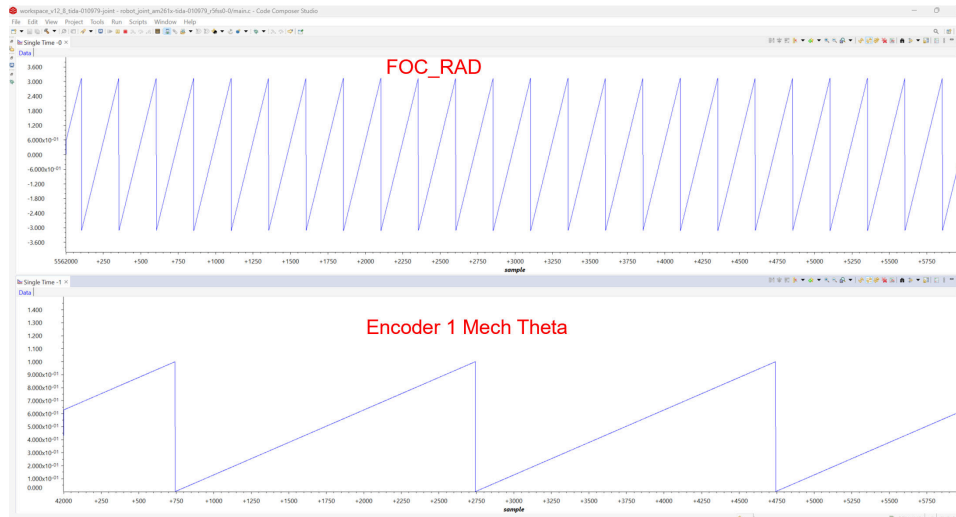


図 4-15. エンコーダ位置フィードバック データ

4.4.5 EtherCAT® 通信

このテストでは、物理層とメディア アクセス制御 (MAC) 層の間でのデータ送信を検証します。さらに、位置ループ制御に使用されるデータ アクセス抽象化層上で EtherCAT リンクと PHP データ オブジェクト (PDO) を検証します。[図 4-16](#) に、物理層と MAC 層の接続を示します。

```

Local Implementation
Pruicss max =3 selected PRU:3
pRegPerm = 0x48002000, dram1=0x48002000, offset = 0x00000000, size = 0x00001400
PRU ESC: Rev 0590 | Bld 0537 | INTC base: 0x48020000, id = 0x4e82a900
INTC.HIDISR addr: 0x48020038
EC_SLV_INT_EEPEMU_prepare:652: Set CatSyncMan[1]:sa=0x1000, len=0x100, ctrl=0x26, ena=1
EC_SLV_INT_EEPEMU_prepare:661: Set CatSyncMan[2]:sa=0x1100, len=0x100, ctrl=0x22, ena=1
EC_SLV_INT_EEPEMU_prepare:670: Set CatSyncMan[3]:sa=0x1200, len=0xc00, ctrl=0xc64, ena=1
EC_SLV_INT_EEPEMU_prepare:687: Set CatSyncMan[4]:sa=0x1e00, len=0xc00, ctrl=0xc20, ena=1
+EC_SLV_APP_setObdValues
Configure Phy bits: PhyAddr:2, LinPol:LOW, PhyAddr:0, LinPol:LOW, (0x5)
DP83826E detected
DP83826E detected
PRU_PHY_detect:152 Phy 0 alive
PRU_PHY_detect:152 Phy 2 alive
PHY Disable Magnetics
PHY Enable Magnetics
TI EtherCAT Toolkit CiA402 for AM261X.R5F - e000059dh / 54490029h
Explicit Device ID : 0x 5

****EC SubDevice*****
Numeric Version: 0x00020101
Source Id: <04930bfed349b5aced41953f837ced6ed9d62c30>
****HWAL*****
Numeric Version: 0x00020100
Friendly Version: <KB HWAL v00.02.01.00>
Source Id: <3764cbb02563e73129376ccac8d785bd6e2773>
****OSAL*****
Numeric Version: 0x00010301
Friendly Version: <KB OSAL v00.01.03.01>
Source Id: <5e1dcc50bb40791bdb358cecc4e4fd35beca6d1e>
*****
SSC_checkTimer:MaxD:9420448 (9)
SSC_checkTimer:MaxET:7
SSC_checkTimer:MaxD:11999872 (11)
PDO size In:0x27/0xd
PDO size Out:0x27/0xd, In:0x27/0xd

```

図 4-16. PHY と MAC 間のデータ送信

図 4-17 に、EtherCAT ステートマシンと PDO ボックスのデータを示します。

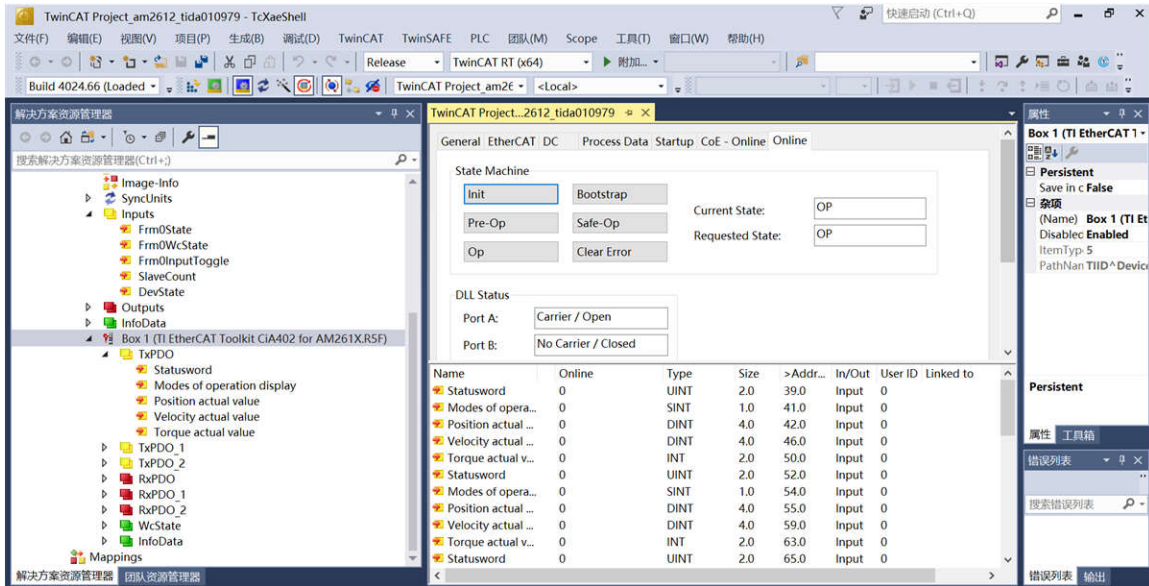


図 4-17. EtherCAT® ステートマシンおよび PDO ボックス

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-010979](#) 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-010979](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.3 レイアウト プリント

レイヤ プロットをダウンロードするには、[TIDA-010979](#) 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

Altium プロジェクト ファイルをダウンロードするには、[TIDA-010979](#) 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

ガーバー ファイルをダウンロードするには、[TIDA-010979](#) 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

アセンブリの図面をダウンロードするには、[TIDA-010979](#) 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™ 統合開発環境 (IDE): Microsoft® Windows® または Linux® 向けの CCS バージョン 12 または 20 をダウンロード
ARM-CGT-CLANG	Arm® コード生成ツール - コンパイラ: Microsoft Windows または Linux 向け TI ARM CLANG LTS をダウンロード
SYSCONFIG	SysConfig のスタンドアロン デスクトップ バージョン: Microsoft Windows または Linux 向けの SysConfig 1.26.2 をダウンロード

ソフトウェア

AM261x MCU+ SDK	MCU PLUS SDK Microsoft Windows インストーラ
AM261x モーター制御 SDK	モーター制御 SDK Microsoft Windows インストーラ
AM261x 産業用通信 SDK	産業用通信 SDK Microsoft Windows インストーラ

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、『[AM261x Sitara™ マイコン データシート](#)』
2. テキサス インスツルメンツ、『[AM261x Sitara™ マイコン テクニカルリファレンス マニュアル \(TRM\)](#)』

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

Sitara™, テキサス・インスツルメンツの™, Code Composer Studio™, 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.

EnDAT® is a registered trademark of Dr. Johannes Heidenhain.

Tamagawa® is a registered trademark of reg.

EtherCAT® is a registered trademark of Beckhoff Automation GmbH.

Profinet® is a registered trademark of PROFIBUS Nutzerorganisation e.V.

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

Linux® is a registered trademark of Linus Torvalds.

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

CHEN GAO は、テキサス インスツルメンツの産業システム ロボティクス チームのシステム エンジニアであり、産業用モータードライブおよびロボティクス向けリファレンス デザインの仕様策定と開発を担当しています。

EASON TIAN は、テキサス インスツルメンツの産業システム ロボティクス チームのシステム エンジニアであり、ロボティクス向けリファレンス デザインの仕様策定と開発を担当しています。

TIDA-010979 リファレンス デザインのソフトウェア開発にあたり、**HAN ZHANG** 氏と **LORI HEUSTESS** 氏からの多大なご協力に感謝します。

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 * (October 2025) to Revision A (March 2026)

Page

- | | |
|--|---|
| • TIDA-010979 リファレンス デザイン全体をサポートするためにドキュメント全体を更新。..... | 2 |
|--|---|

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日 : 2025 年 10 月