

Application Note

低電圧ドローン、ロボット、サーボドライブ向けの高精度電流検出



Elia Hanna, Martin Staebler, Isolated Converters

概要

このアプリケーション ノートでは、24V ~ 100V DC バス電圧で動作する 3 相モーター制御インバータの 2 つのシャントベース同相電流検出設計を比較します。比較対象は、AMC0106M05 / AMC0106M25 機能絶縁型デルタシグマ変調器と、強化された PWM 除去機能を備えた INA241A 非絶縁型電流センス アンプです。AMC0106M05 は $\pm 50\text{mV}$ 、AMC0106M25 は $\pm 250\text{mV}$ のリニア入力範囲をサポートしており、INA241A は $-5\text{V} \sim 110\text{V}$ の同相入力範囲で動作します。代表的なアプリケーションは、バッテリー動作のドローン、サーボドライブ、60V 未満の電源で動作する協働ロボットやヒューマノイド ロボットです。どちらのデバイスも、産業用温度範囲全体にわたって 1% 未満の測定精度を実現し、高精度モーター制御の要件を満たしています。

ここでは、分解能、ノイズ耐性、伝搬遅延、マイコン インターフェイスの要件について、この 2 種類のアーキテクチャのトレードオフを検討します。AMC0106Mxx デュアルグランド アーキテクチャは、ブランキング期間のない固有の PWM スウィッチング ノイズ耐性を備えています。専用のハイサイド電源とシグマデルタフィルタ チャネルを搭載するマイコンが必要になりますが、OSR32 ~ 128 の Sinc3 フィルタによるオーバーサンプリングで 12 ビットを超える ENOB を実現します。INA241A は、スイッチト キャパシタ PWM 除去フィルタを使用し、1MHz 帯域幅で $0.25\mu\text{s}$ の伝搬遅延、9 ~ 11 ビットの ENOB を実現します。必要なのは、外部 ADC と電圧リファレンスのみです。どちらの設計も合計サイズが小さいため、スペースに制約のあるモーター制御設計に最適です。

目次

1 システムの概要.....	2
2 インライン電流センス デバイスのオプション.....	4
2.1 同相電圧と動作電圧との関係.....	4
2.2 デバイス アーキテクチャの比較.....	5
2.3 パフォーマンス上の利点の分析.....	6
3 まとめ.....	9
4 参考資料.....	10

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 システムの概要

通常 24V ~ 100V の DC バス電圧で動作する低電圧モーター制御アプリケーションで高精度な電流検出を行うには、設計上の独自の課題が多く存在するため、どの電流センス デバイスがシステムに最も適切かを慎重に考慮しなければなりません。このアプリケーション ノートでは、シャントベースの同相電流検出設計に焦点を当てています。ローサイド シャントを経由してモーター電流を間接的にセンシングする場合と比べると、同相電流検出にはシステム上の大きな利点があります。モーターの相電流を連続的に測定するため、同相センシングでは特に PWM デューティ サイクルが小さい場合、過サンプリングによる高精度で低ノイズの電流検出が可能になります。同相センシングを行うと、PID 電流コントローラを PWM ごとに 2 回動作させて、電流ループ帯域幅を拡大し、トルク応答を高速化することもできます。また、同相センシングでは、位相間および位相から GND への短絡が高速に検出されるため、システムの堅牢性が高まります。同相センシングのもう 1 つのシステム上の利点は、ローサイド Si-FET または GaN-FET のソースがシステム グランドを直接基準とすることです。寄生インピーダンスが追加されていないため、ローサイド シャントベースの設計に比べて、PWM スwitching 時のスイッチ ノードのリンギングを低減できます。

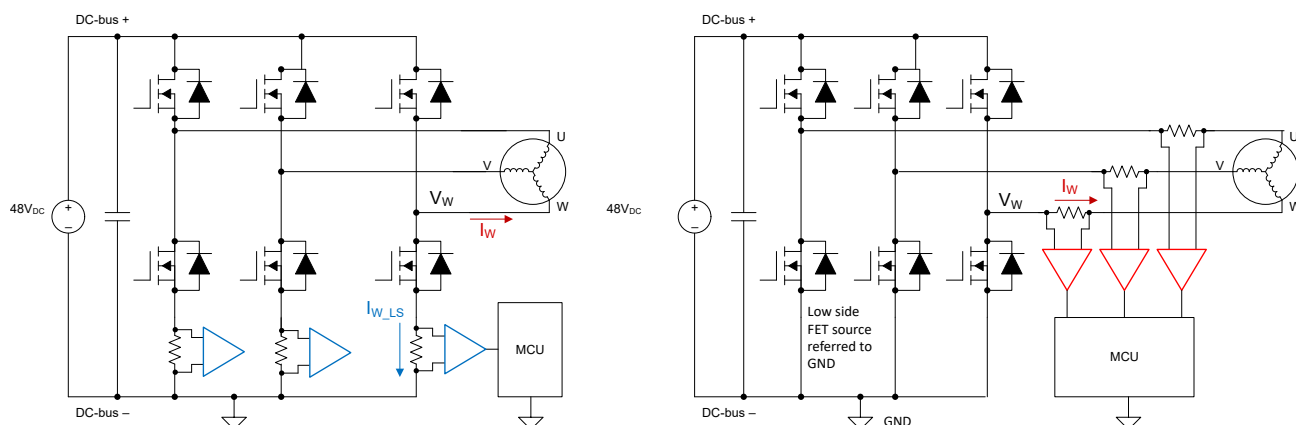


図 1-1. 3 相モーター電流検出アーキテクチャ: ローサイド シャントベース (左側) と同相シャントベース (右側)

ローサイド シャントベースのセンシングの同相電圧はシステム GND に対してほぼ 0 ですが、同相電流センス デバイスは DC バスによって決定される PWM スwitching 同相電圧で動作します。さらに、同相電流センス デバイスは、図 1-2 に示すように、48V の DC バス電圧で PWM スwitching 中に DC バスを上回るオーバーシュートや、システム グランドを下回るアンダーシュートが発生しても位相電流を正確に測定できるように、10V/ns 以上のスルーレートの同相電圧過渡に対して高い耐性 (CMTI、PWM 除去) を備えている必要があります。

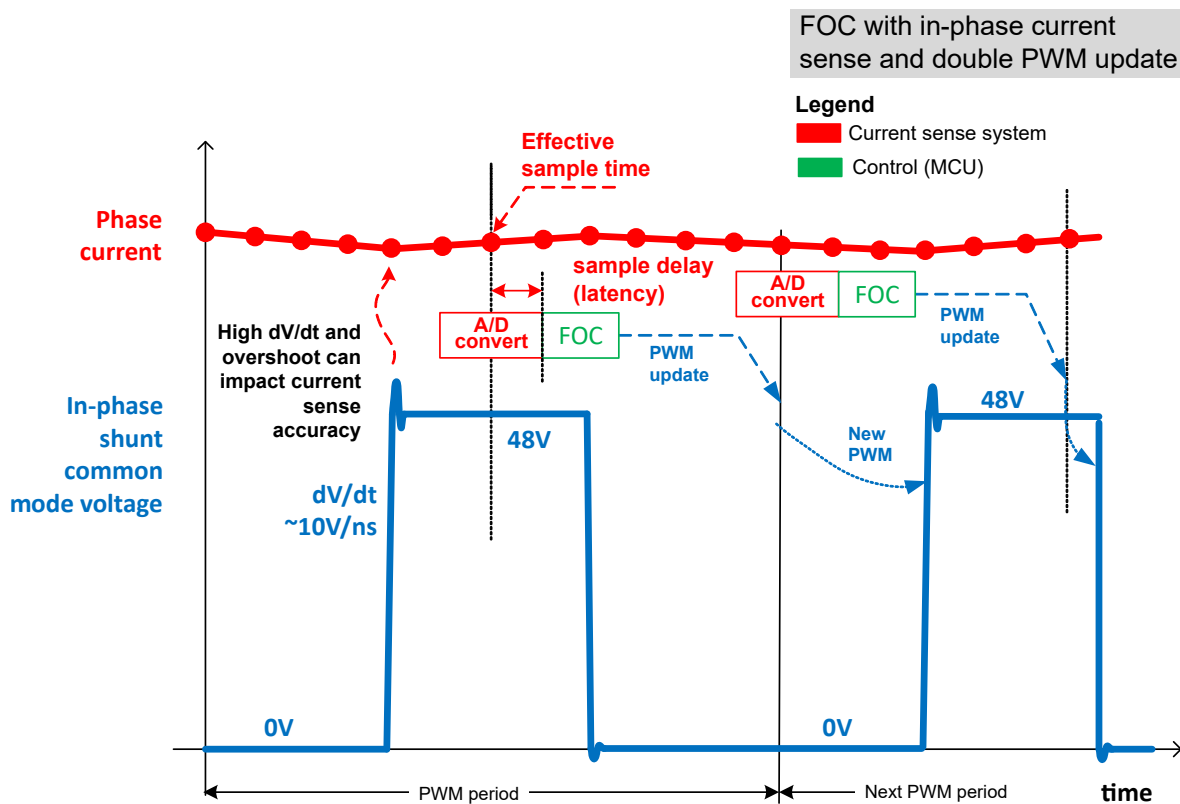


図 1-2. ダブル PWM 更新時の 1 PWM サイクルにおける同相シャントの同相 AC 電圧

2 インライン電流センス デバイスのオプション

シャント ベースのシステムでは、高い同相電圧と高い同相電圧過渡に対応できる絶縁型および非絶縁型電流センス デバイスを使用できます。

絶縁型と非絶縁型のどちらの電流センシング アーキテクチャを選択しても、精度、有効分解能と信号対雑音比、伝搬遅延、システムレベルのノイズ耐性、マイコンへのアナログまたはデジタル インターフェイス、などのトレードオフが存在します。

TI の最新のガルバニック絶縁型変調器 AMC0106M05 / AMC0106M25、強化された PWM 除去機能を備えた非絶縁型双方向超高精度電流センス アンプ INA241A について見てみましょう。どちらのデバイスも、バッテリー動作の低電圧ドローン、24V ~ 60V のロボットやサーボドライブなど、高精度モーター制御アプリケーションで求められる 1% 以上の精度要件を達成できます。

2.1 同相電圧と動作電圧との関係

機能絶縁型デバイスと非絶縁型デバイスの機能と要件を理解するには、まず、これらのデバイスに関連する仕様をまとめ、デバイスの動作範囲を表す方法の違いをよく認識する必要があります。絶縁型と非絶縁型のどちらのデバイスを使用するかによって用語が異なることがありますが、使用事例と意味に変わりはありません。

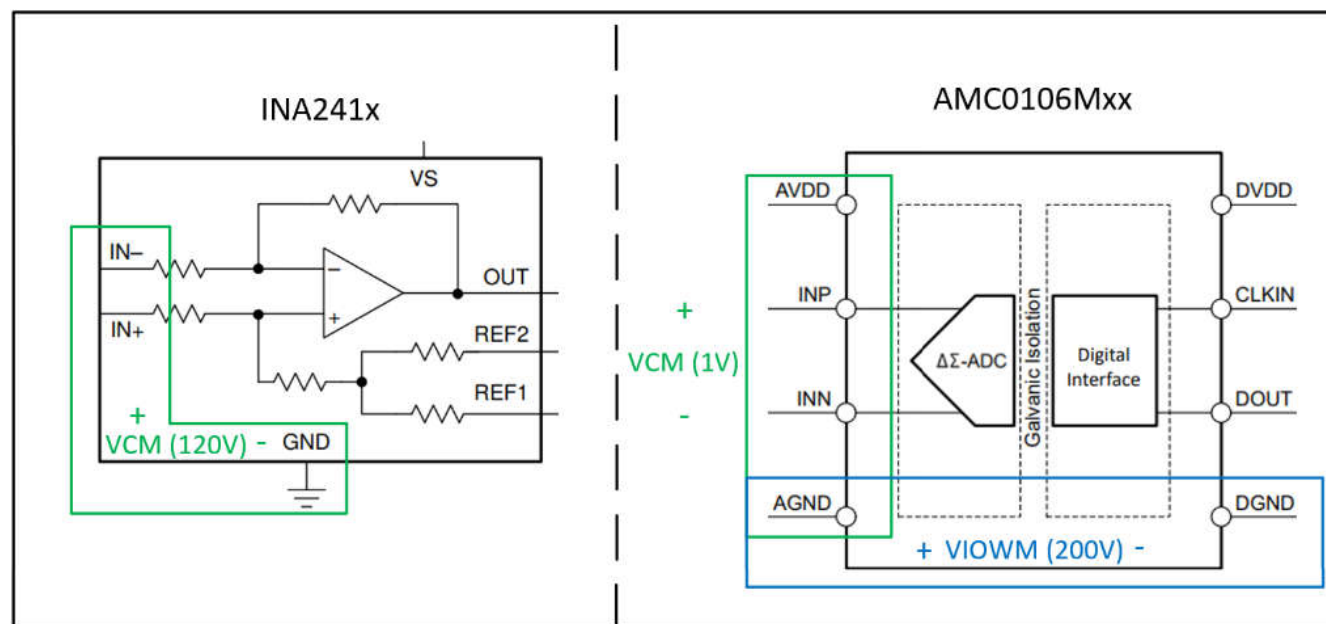


図 2-1. 絶縁型システムと非絶縁型システムにおける VCM と VIOWM の関係

図 2-1 に、非絶縁型デバイスで同相入力電圧がシステム グランドを基準として許容される入力ピン電圧をどのように表すかを示します。この仕様により、デバイスの性能を犠牲にせずに適用可能な同相電圧範囲が決まります。INA241 の場合、最高の性能を得るための推奨範囲は $-5\text{V} \sim 110\text{V}$ で、デバイスが動作する絶対最大範囲は $-20\text{V} \sim 120\text{V}$ ですが、性能は低下します。

図 2-1 に示すように、容量性絶縁型の AMC0106M05 ($\pm 50\text{mV}$ リニア入力範囲) や AMC0106M25 ($\pm 250\text{mV}$ リニア入力範囲) などの絶縁型設計では通常、絶縁バリアの劣化によるデバイスの故障を防ぐため、動作電圧の仕様を使用してデバイスの動作範囲をアサートします。動作電圧は、デバイスの 2 つの完全に絶縁されたグランドである AGND と DGND の間で許容される電圧差を規定します。AMC0106 の最大動作電圧は、これら 2 つのグランド間で 200Vrms または 280Vdc です。これにより、シャントの PWM スイッチング同相電圧とシステム グランドとの関係を処理できます。非絶縁型電流センス アンプの INA241A とは異なり、AMC0106Mx の INP および INN 差動入力ピンの同相入力電圧範囲は、アナログ AGND、 $\text{VCM} = 1\text{V} \sim -160\text{mV}$ (AMC0106M25)、 $\text{VCM} = 1\text{V} \sim -32\text{mV}$ (AMC0106M05) に対してはるかに小さくなっています。したがって、AMC0106Mx AGND は、目的の電流方向に応じて、シャント上の端子の 1 つに接続する必要があります。

アプリケーションでは、この 2 つの異なる仕様により、モーター制御システムの最大許容電圧を決定するという中核的な問題が解決されます。非絶縁型設計で同相電圧を取り扱う場合と、絶縁型アーキテクチャで動作電圧を取り扱う場合のどちらであっても、エンジニアは高精度の測定を維持できるよう、システム内にあるデバイスが規定の制限範囲内にとどまっていることを検証する必要があります。根本的なレベルでの主な違いは、各アーキテクチャがこれらの同相電圧ストレスにどのように対処するかにあります。たとえば、AMC0106M05 などの絶縁型デバイスには、ガバナニク絶縁を使用する固有の保護機能が備わっていますが、非絶縁型設計では電圧差の管理をシステムレベルで慎重に設計する必要があります。高電圧システムでは、これは重要な違いになりますが、約 48V の低電圧設計の場合、両方の設計の最大範囲を大幅に下回るため、それほど重要ではありません。

2.2 デバイス アーキテクチャの比較

2.2.1 INA241: PWM 除去機能を内蔵した非絶縁型アナログ アンプ

INA241 は、速度と簡素化を重視して最適化された高性能アナログ アンプ アーキテクチャを採用しています。INA241 の非絶縁設計には、内部回路と出力の両方に 1 つのグランド基準電圧が使用されているため、PCB レイアウトが簡素化され、部品数を減らすことができます。アナログ出力インターフェイスにより、複雑なデジタル フィルタリングや処理を必要とせずに、増幅された電流信号に即座にアクセスできます。このデバイスの合理化されたアーキテクチャにより、1MHz 帯域幅の優れた仕様が実現されているため、INA241 は制御ループの低レイテンシが必要なアプリケーションに最適です。アナログ インターフェイスを使用することで、既存の A/D コンバータおよび制御システムとの統合が容易になります。ただし、このようなモーター制御システムでは通常、電流検出アンプなどのアナログ デバイスでブランキング期間が使用されます。この期間は約 2 μ s ~ 3 μ s のデッドタイムであり、PWM スwitchング中のアーティファクトやノイズ スパイクがカウントされないようにします。PWM スwitchング周波数が高くなると、これらのブランキング期間に、読み取り値のミスやデータの障害が発生する可能性があります。これに対処するため、INA241 はスイッチト キャパシタ フィルタ アーキテクチャを使用してスitchング ノイズを減衰させます。このフィルタは、最大 125kHz までの PWM 周波数の変化、または各同相過渡の間隔が 3 μ s を超える場合に、サンプリング レートを動的に調整します。

INA241 のもう 1 つの利点は、PWM (パルス幅変調) 除去機能と高 CMRR です。ただし、これらのモーター制御システムでは、電流センス アンプのようなアナログ デバイスに大きな同相モード $\Delta V/\Delta t$ 過渡が観測されます。PWM 信号に関連する大きな $\Delta V/\Delta t$ 同相過渡は、モーターやソレノイドドライブ、スitchング電源などのアプリケーションで採用されています。同相過渡が原因となり、電流検出アンプの出力で揺動が発生することがあり、これによって測定の誤りが発生し、出力が有効な時期が制限されます。INA241x の設計には、強化された PWM 除去機能が含まれています。これは高い同相信号除去技術で、デバイスの出力を 1 μ s 保持し、同相の揺動が出力に伝播することを防止します。これに続く 3 μ s の間に別の同相モード過渡が発生した場合、INA241x は高帯域幅と AC CMRR によって同相モード過渡の影響を減衰させます。PWM 除去の強化が有効になるのは、PWM 周波数が最高 125kHz まで、または同相モード過渡のエッジが 3 μ s 以上に分離された場合です。これによって、INA241x を使用するシステムの設計が簡単になります。INA241x は AC CMRR が高く、信号の帯域幅も高いため、従来の電流検出アンプと比べて、同相遷移時の出力の乱れとリンギングを最小限に抑えることができます。

2.2.2 AMC0106: 高 CMRR 機能絶縁型デルタ シグマ変調器

AMC0106 は、高性能絶縁型デルタ シグマ変調器アーキテクチャを採用し、いくつかの独自の利点があります。デバイスの機能絶縁により、AC モーターと直列の高電圧センシング入力と低電圧デジタル インターフェイスの間に完全なガバナニク絶縁が得られるため、グランド ループの問題が排除され、安全性が向上します。このデバイスは、最新のプロセスと直接通信するデジタル ビット ストリームを出力し、データ転送時に非常に優れたノイズ耐性を実現します。また、AMC0106 では、GND1 が高電圧側に接続され、入力段に同相過渡が発生しないように、ハイサイドとローサイドで別のグランド基準が採用されています。このデュアルグランド アーキテクチャは、高周波スitchング アーティファクトがハイサイド グランドに絶縁されたままになり、デジタル通信パスに結合することはできないため、PWM スitchング ノイズを本質的に除去します。これらはすべて、PWM の除去を目的とした回路設計を行うことなく実現されます。このデザインは、特に、スitchング速度が継続的に向上している現状において、モーター ドライブ アプリケーションで一般的に見られるスitchング ノイズに対して非常に優れた耐性を実現しています。

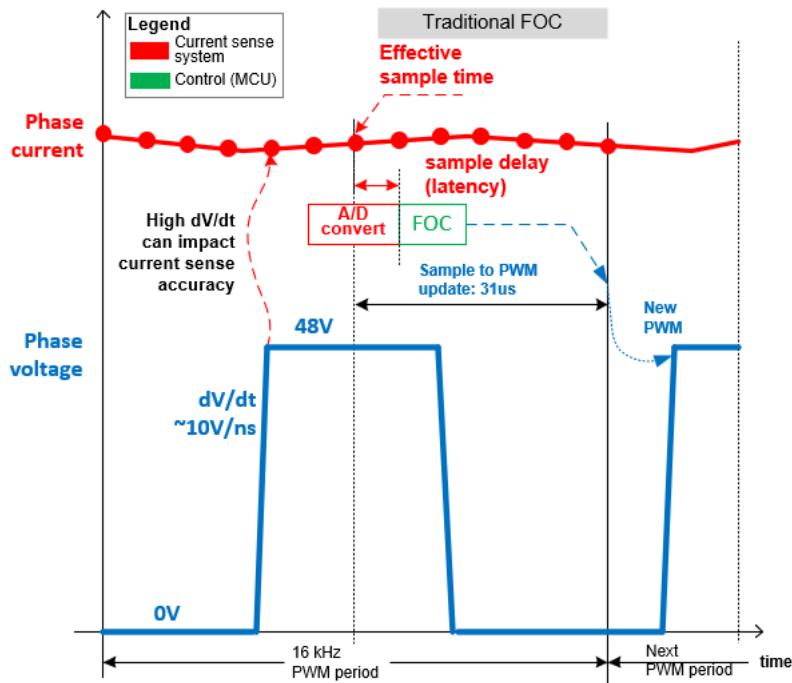


図 2-2. 閉ループ位相電流制御と短絡検出のための電流サンプリング

現在の多くのアナログ設計では、スイッチング サイクル中に発生するノイズ スパイクに対処するために、ブランキング期間の実装が必要となります。スイッチング周波数が高くなると、PWM サイクル時間が短くなり、固定のブランキング期間がより多くの割合を占めるため、適切なデータ アクイジションができなくなる可能性があります。テキサス インストルメンツの AMC0106M05 および AMC0106M25 変調器は 150V/ns の高い CMTI を備えており、連続したサンプリングが常に可能で、デバイスの機能絶縁による固有のノイズ耐性があるため、ブランキング期間は不要です。これにより、PWM スwitchング サイクル全体で連続的な測定が可能になり、常にモーターのステータスを把握できます。

2.3 パフォーマンス上の利点の分析

2.3.1 精度

どちらのデバイスも、1% 未満という優れた測定誤差を達成しており、高精度のモーター制御アプリケーションの厳しい要件を満たしています。ただし、AMC0106M05 のデジタル アーキテクチャには、ノイズと分解能を維持するうえで本質的に利点があります。絶縁型デルタ シグマ変調器は、オーバーサンプリングとデジタル フィルタリングにより非常に優れた分解能を実現します。また、デジタル インターフェイスにより、長いトレース配線で発生する可能性のあるアナログ信号の劣化が除去されます。図 2-3 に示すように、AMC0106 は現在市場で最高の分解能である 14 ビットの有効ビット数を実現できます。この分解能の向上により、トルクリップルが減少し、位置をより正確に保持できるようになります。動作精度が向上すると同時に、定常状態動作時のジッタが低減します。

INA241 は、同じ分解能を達成することはできませんが、11 ビットの非常に優れた ENOB を実現できます。この点を踏まえて、INA241 のアナログ アーキテクチャは最小限の処理要件で信号の即時可用性を実現していますが、アナログ信号は電氣的に過酷な環境で基板レベルのノイズや干渉の影響を受けやすくなります。このアーキテクチャでは、INA241 の伝搬遅延は 1MHz 帯域幅でわずか 0.25μs になり、AMC0106 の追加のフィルタリングには 2.4μs ~ 9.6μs の伝搬遅延が必要ですが、ノイズ結合に対する保護機能を備えています。

2.3.2 ノイズ耐性

INA241 には、強化された PWM 除去フィルタリングがデバイスに組み込まれています。PWM スwitchング中に電流測定のタイミングで必要に応じて信号を自動的にブランクにし、適切なフィルタを適用してスイッチング過渡の影響を最小限に抑えることができます。これにより、INA241 は PWM に起因する大きなノイズがあるにもかかわらず、正確な電流測定を行います。

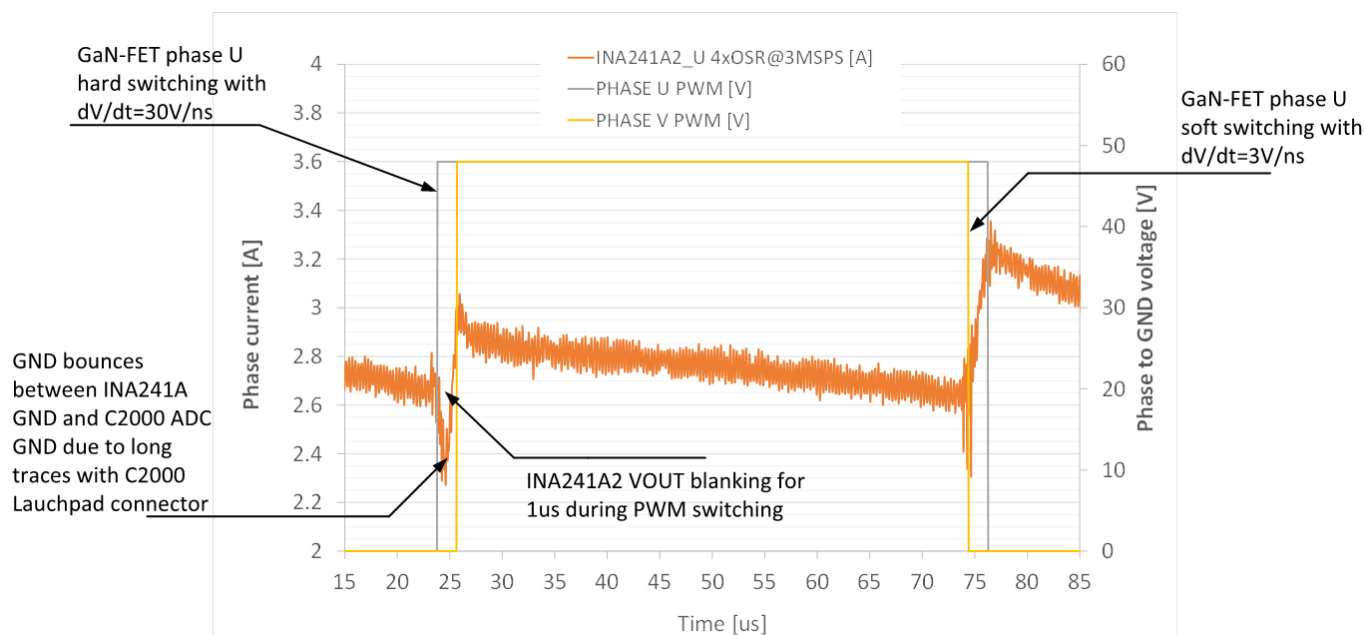


図 2-3. INA241 は、ブランキング期間および高 PWM 除去フィルタリング アーキテクチャを採用し、3MSPS ADC で 4 倍のオーバーサンプリングと平均化を行い、500ns のレイテンシを実現します。

同様に、AMC0106M05 は、複数のメカニズムにより非常に優れたノイズ耐性を示しています。デバイスのガルバニック絶縁は、PWM スイッチング ノイズに起因するエラーを防止します。一方、デジタルビット ストリーム出力は、信号送信中もアナログ干渉への耐性を維持します。デュアルグランド アーキテクチャは、ハイサイド グランド プレーンのスイッチング ノイズを絶縁することで、非常に優れた PWM 除去を実現します。

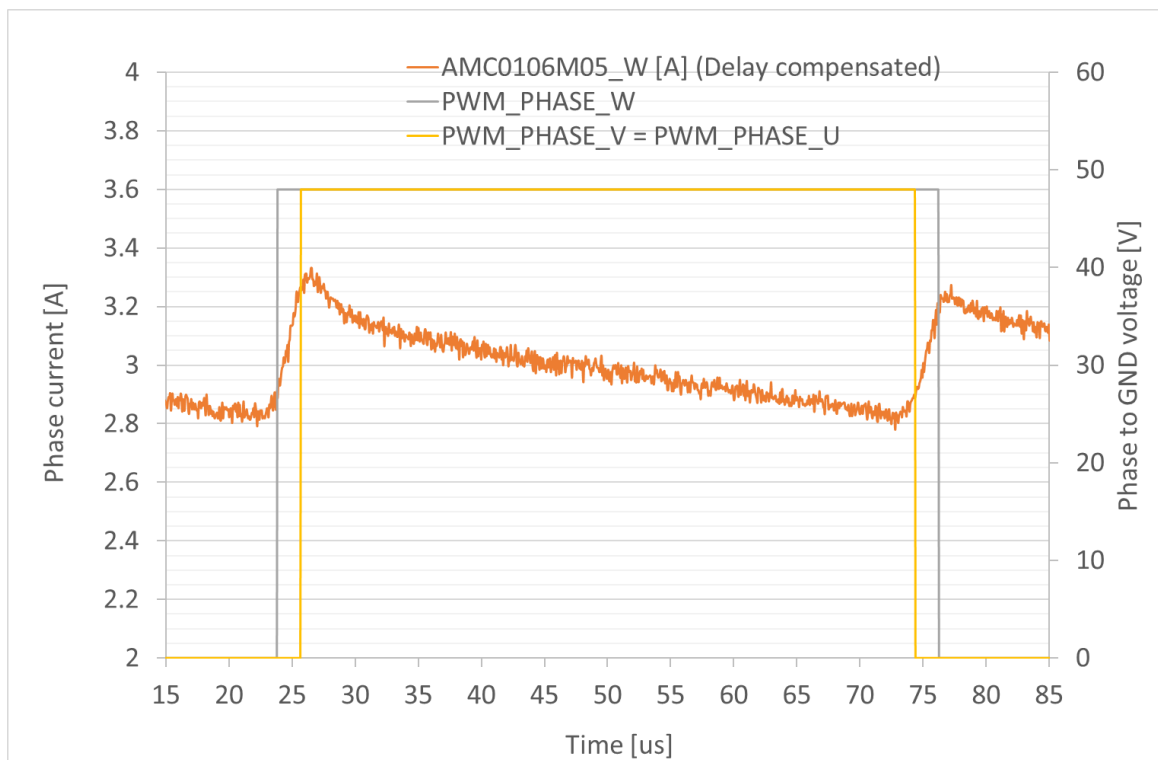


図 2-4. AMC0106 は、ハイサイドとローサイド用に個別のグランドを備えており、最高のノイズ性能を実現します

2.3.3 サイズ

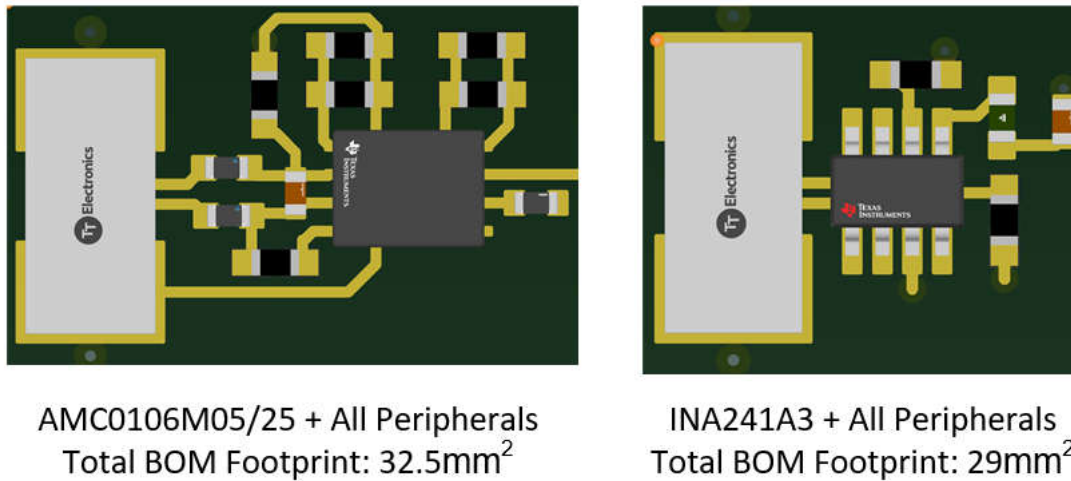


図 2-5. テキサス インスツルメンツは、魅力的なサイズで極めて競争力の高いデザインを提供

AMC0106 と INA241 は、総設計サイズがそれぞれ 32.5mm²、29mm² という非常に競争力の高いサイズで、スペースに制約のあるドローン、ロボット、低電圧サーボドライブをベースとしたモーター制御アプリケーションに実用的です。

2.3.4 設計上の考慮事項

AMC0106 には、設計者が実装する際に注意する必要がある 2 つの重要な要件があります。まず、ノイズ耐性を高めるため、このデバイスには絶縁バリアが内蔵されています。つまり、デバイスのハイサイドとローサイドに個別の電源が必要です。この課題を克服する最も一般的な方法は、ハイサイド ゲートドライバ電源を使用することです。次に、AMC0106 は、最大 14 ビットの分解能、マイコンとの直接インターフェイスを実現するために、シグマデルタ フィルタ チャネルを内蔵したプロセッサを必要とする変調器デバイスです。INA241 を使用すると、ADC だけでアナログ出力を必要なデジタル出力に変換できるため、実装が容易になります。また、リファレンス電圧は、デバイスで可能な限り最高の精度を達成するのにも役立ちます。

3 まとめ

AMC0106M05 絶縁型電流センス変調器と INA241 非絶縁型電流センス アンプには、高精度モーター制御アプリケーション向けの独自の利点があります。AMC0106M05 の絶縁型デルタシグマ アーキテクチャは、ガルバニック絶縁およびデュアルグランド設計により、グラウンド ループ、PWM スイッチング ノイズ、その他の電氣的な外乱に対する耐性を備えています。これにより、このデバイスは外部ブランキングやタイミング調整を必要とせずに、非常に優れた精度と分解能を維持できます。一方で、INA241 の高性能アナログ アプローチでは速度と簡潔さを優先していますが、これは、スイッチング過渡の影響を最小限に抑える先進的な PWM 除去フィルタリングによって補完されています。

テクノロジー	シャント + AMC0106Mxx	シャント + INA241x
デバイスの例	AMC0106M05	INA241A3
評価基板	BP-AMC0106-LMG-MD	INA241AEVM
電流範囲 (FSR) ⁸	最大 ±200A までスケールリング可能	最大 ±200A までスケールリング可能
過負荷電流	High (18x FSR)	High (18x FSR)
精度 (-40 ~ 85°C、標準値)	1% 未満	1% 未満
ENOB (SNR)	>12bit	9 ~ 11 ビット
帯域幅	40kHz ~ 160kHz (Sinc3 OSR32-128)	1MHz
伝搬遅延	中 (2.4 ~ 9.6us) Sinc3 フィルタに起因	低 (0.25μs)
GND ノイズに対する耐性	高 (デジタル インターフェイス)	中 (アナログ インターフェイス)
PWM 除去	高 (機能絶縁)	中
絶縁型電源	あり	なし
その他の要件	sinc フィルタ内蔵マイコンとハイサイド電源が必要	最高精度の実現には電圧リファレンスが必要

4 参考資料

1. テキサス インスツルメンツ、『[TIDA-010979:産業用通信機能搭載、48V、1kW ロボットのジョイントモーター制御のリファレンスデザイン](#)』、リファレンス デザイン
2. テキサス インスツルメンツ、『[TIDA-010956:統合型モーター ドライブ向け、48V、85A、小型フォーム ファクタ、3 相インバータのリファレンス デザイン](#)』、リファレンス デザイン
3. テキサス インスツルメンツ、『[AMC0106 評価基板](#)』、評価基板
4. テキサス インスツルメンツ、『[INA241A 評価基板](#)』、評価基板
5. テキサス インスツルメンツ、『[ヒューマノイド ロボットの電流検出](#)』、アプリケーション ブリーフ。
6. テキサス インスツルメンツ、『[エンジニア向け絶縁型シグナル チェーン ソリューション ガイド](#)』、e-book
7. テキサス インスツルメンツ、『[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センサ](#)』、アプリケーション ノート
8. テキサス インスツルメンツ、『[電流と電圧の高度なセンシングを活用して超高精度ロボットを実現する方法](#)』、技術記事
9. テキサス インスツルメンツ、『[ヒューマノイド ロボットのモーター制御](#)』、アプリケーション ブリーフ
10. テキサス インスツルメンツ、『[移動型ロボットロボットの電流検出](#)』、アプリケーション ブリーフ。
11. テキサス インスツルメンツ、『[協働および産業用ロボット アームにおける電流検出](#)』、アプリケーション ブリーフ
12. テキサス インスツルメンツ、『[ヒューマノイド ロボットのセンシング](#)』、アプリケーション ブリーフ。

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みいかなる保証も、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、TI は一切の責任を拒否します。

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 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](https://www.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