

## Application Note

**DRV8376 によるローサイド電流センシングの最適化:ゲイン誤差と温度ドリフトの低減**

Akhilesh Kesavanunnithan

## 概要

DRV8376 は 3 相モータードライバで、ローサイド電流センスアンプを内蔵しており、BLDC モーターアプリケーションの効率的な電流監視を可能にし、過電流保護、トルク制御、整流をサポートします。ただし、ゲイン誤差と温度ドリフトは測定精度の低下を招き、モーターの性能に影響を及ぼす可能性があります。このアプリケーションノートは、DRV8376 の電流センスアンプのアーキテクチャと誤差発生源を検討し、室温、複数温度、自己キャリブレーション、ソフトウェアベースの補償など実践的なキャリブレーション手法を提案して、広い温度範囲で精度を検証します。このアプリケーションノートは、DRV8376 を使用して電流センシングを最適化する直接的な戦略を解説しています。

## 目次

1 はじめに.....	2
2 DRV8376 を使用したローサイド電流検出の利点と課題.....	3
2.1 ローサイ 電流検出の利点.....	3
2.2 ローサイド電流検出の課題.....	3
3 DRV8376 電流センスアンプ (CSA) アーキテクチャ.....	4
3.1 ゲイン誤差と温度との関係.....	4
3.2 キャリブレーション手法.....	5
4 まとめ.....	6
5 参考資料.....	6

## 商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 はじめに

DRV8376 は、4.5V ~ 65V のブラシレス DC モーターを駆動するためのゲートドライブと電力段を提供します。

DRV8376 は、大電力駆動能力を実現するため、70V の絶対最大定格と 400mΩ (ハイサイドとローサイドの合計) という非常に小さい RDS(ON) を持つ 3 つのハーフ H ブリッジを内蔵しています。内蔵の電流検出機能を使用して電流を検出するので、外付けの検出抵抗は不要です。内蔵 LDO による電源管理機能が、デバイスに必要な電圧レールを生成します。また、外部回路に電力を供給するためにも使用できます。DRV8376 には 6x または 3x の PWM 制御方式が実装されており、センサ付きまたはセンサレスのフィールド オリエンテッド制御 (FOC)、正弦波制御、または外付けマイコンを使用した台形制御を実現できます。DRV8376 は、最大 100kHz の PWM 周波数で駆動できます。制御方式は、モーター電流制限動作からフォルト応答まで、ハードウェア ピンまたはレジスタ設定を使って詳細に設定できます。

DRV8376 は、内蔵電流センシングを使った電流測定のために、3 つの高性能ローサイド電流センス アンプを内蔵しています。ローサイド電流測定は、一般に過電流保護、外部トルク制御、または外部コントローラによるブラシレス DC 整流の実装に使用されます。この 3 つのすべてのアンプは、各ハーフブリッジレグの電流センシングに使用できます (ローサイド FET)。電流センス アンプには、プログラマブル ゲインなどの機能が含まれており、電圧リファレンスピン (VREF) で外部リファレンスが提供されます。

## 2 DRV8376 を使用したローサイド電流検出の利点と課題

ローサイド電流検出は、DRV8376 統合型電流センスアンプ (CSA) に実装されており、ブラシレス DC (BLDC) モータードライブの位相電流を監視するために広く採用されている手法です。この構成は、統合型センス FET ベースの方法を採用しており、コスト重視かつ高性能なモーター制御アプリケーションに明確な利点をもたらします。ただし、このアプリケーションは特定の誤差発生源、特にゲイン誤差と温度ドリフトに脆弱であり、精度を検証するためにはこれらの問題を解決する必要があります。このセクションでは、DRV8376 を用いたローサイド検出の主な利点と、慎重なキャリブレーション手法が必要となる課題について概説します。

### 2.1 ローサイ 電流検出の利点

#### 2.1.1 低い同相電圧

ローサイドセンシングでは、検知素子の両端の電圧はグランド電位近くにあり、その結果、同相モード電圧は低くなります (通常 1V 未満)。これにより、同相電圧がモーター電圧 (例えば 24V または 48V) に達する可能性のあるハイサイドセンシングに不可欠な、高同相信号除去比 (CMRR) アンプを不要にできます。DRV837x の内部 CSA はこの低同相環境用に最適化されており、SOx 出力 ( $V_{SOx} = I_{SENSE} \times G_{CSA} + V_{REF}/2$ ) は安定した VREF ピンを基準としているため、よりシンプルで低コストな高精度アンプ設計が可能になります。

#### 2.1.2 優れたコスト効率

ローサイド電流検出は、ハイサイド構成で必要となる高電圧の絶縁型検出部品が不要であるため、本質的に経済的です。DRV8376 の統合型センス FET により、高精度、低温オプションで 0.50 ~ 2.00 ドルの範囲になる外部シャント抵抗器が不要になるため、コストがさらに削減されます。この統合により、部品表 (BOM) が簡素化され、PCB スペースが削減されるため、DRV8376 は、消費者向け家電製品やエントリーレベルの自動車システムなど、コスト重視のアプリケーションに最適な選択肢となります。

### 2.2 ローサイド電流検出の課題

ローサイド電流検出には利点がありますが、特に精密 BLDC モーター制御アプリケーションでは、測定精度を低下させるエラー源の影響を受けやすいという欠点があります。主な課題は、ゲイン誤差と温度ドリフトであり、これらはトルク制御、過電流保護、および整流のための信頼性の高い電流測定を行うデバイスの能力に直接影響します。

#### 2.2.1 ゲイン誤差

ゲイン誤差は、DRV8376 の内部ゲイン設定抵抗の不一致と、電力ステージの FET と SenseFET の間の不一致から発生します。例えば、CSA のゲインネットワークに 1% の不一致 (例:  $G_{CSA} = 0.4V/A$ ) があると、SOx 出力電圧に対応する 1% の誤差が生じ、電流の測定精度に影響を及ぼす可能性があります。モータードライブでは、この誤差が原因で、トルク制御の不正確さや整流タイミングの不正確さにつながり、効率と性能が低下する可能性があります。

#### 2.2.2 温度ドリフト

温度変動は、CSA の内部ゲインネットワークの温度係数 (通常 20ppm/°C) および PCB トレースやシャント抵抗器などの外部部品 (50~200ppm/°C) を通じて、ゲイン誤差を悪化させます。DRV8376 の動作範囲である -40°C ~ +150°C では、温度係数が低くても顕著なドリフトが発生する可能性があります。例えば、100°C の範囲で 20ppm/°C のドリフトが発生すると、0.2% のゲイン誤差が生じ、SOx 出力に測定可能な誤差として現れ、自動車や産業用などの過酷な環境におけるシステム信頼性に影響を及ぼす可能性があります。

### 3 DRV8376 電流センスアンプ (CSA) アーキテクチャ

DRV8376 は、最終段アンプのオフセット誤差に関連する誤差を軽減するための適応型オフセットキャリブレーション機能を備えた、senseFET ベースのローサイド電流センスアーキテクチャを電流センスアンプ (CSA) に実装しています。下の図は、CSA の簡略化されたブロック図を示しています。

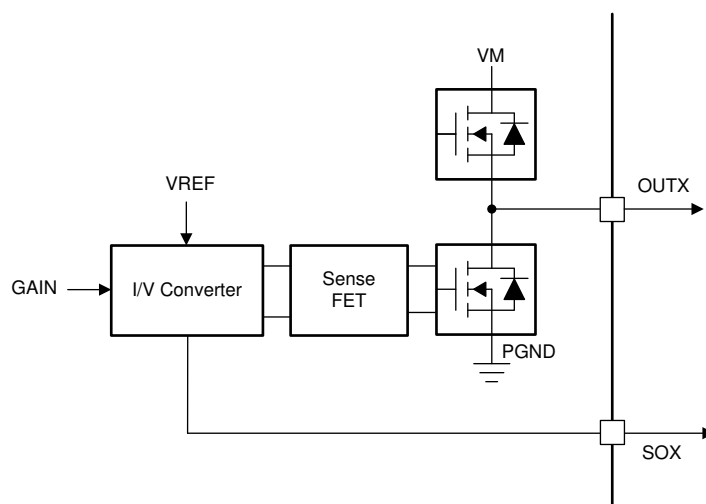


図 3-1. 電流センスアンプのアーキテクチャ

DRV8376 の SOx ピンは、ローサイド FET を流れる電流にゲイン設定 ( $G_{CSA}$ ) を乗算した値に比例するアナログ電圧を出力します。ゲイン設定は、GAIN ピン(ハードウェアデバイスバリエーション)または GAIN ビット(SPI デバイスバリエーション)で 4 段階に調整可能です。電流検出は、DRV8376 デバイスの各ローサイド FET 上のセンス FET によって実装されています。この電流情報は内部 I/V コンバータに供給され、VREF ピンの電圧とゲイン設定に基づいて SOx ピンに CSA 出力電圧を生成します。CSA の出力電圧は以下のように計算できます。

$$SOX = \left( \frac{V_{REF}}{2} \right) \pm GAIN \times I_{OUTX} \quad (1)$$

#### 3.1 ゲイン誤差と温度との関係

ゲイン誤差とは、温度変化の影響を受けることが多い、実際のゲインと公称ゲイン値との偏差を指します。DRV8376 などの 3 相モータードライバの場合、ゲインは通常、40°C から 125°C の温度範囲にわたって線形依存性を示し、電流検出アンプまたは PWM 出力の精度に影響を及ぼします。図 3-2 は、2 つの異なるモーター電圧 24V と 48V での DRV8376 のゲイン誤差を示しています。

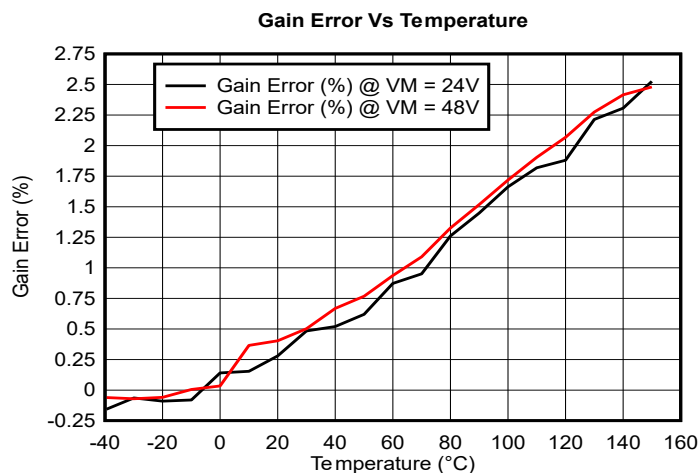


図 3-2. 未校正ゲイン誤差

### 3.2 キャリブレーション手法

DRV8376 のゲイン誤差に対処するには、以下のキャリブレーション方法を使用できます。室温キャリブレーションでは、DRV8376 電流センス・アンプのゲイン誤差を単一の温度 (通常は 25°C) で測定し、測定されたゲインを公称値に調整するために固定の補正係数を適用しますが、このアプローチでは温度によるドリフトが考慮されないため、-40°C および +125°C で誤差が発生します。多温度校正は、-40°C、25°C、125°C などの複数の温度でゲイン誤差を測定し、ゲイン誤差データに線形モデル  $y = mx + c$  を適合させ、ゲイン誤差を基準ゲインで正規化して測定ゲインを補正します。これにより、温度範囲全体でほぼゼロの誤差を実現します。ソフトウェアベースの補正方式で、事前キャリブレーション済みのパラメータ (傾き (m)、切片 (c)) をファームウェアに保存し、式を用いて測定されたゲインにリアルタイムで補正を適用します。

$$G_c(T) = \frac{G_m(T)}{1 + \frac{(m \cdot T + c)}{100}} \quad (2)$$

この方法は、ゲイン誤差データを線形モデルに適合させます。

$$G(T) = G_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) \quad (3)$$

から

$$E(T) = m \cdot T + c \quad (4)$$

1. E(T): ゲイン誤差 (%)。
2. m: 勾配 (%/°C)。
3. C : インターセプト (%)

この方法は、測定されたゲインが次のように想定しています。

$$G_{\text{measured}}(T) = G_{\text{nominal}} \cdot (1 + E(T)/100) \quad (5)$$

キャリブレーションは、ゲインを公称値に補正します。

$$G_{\text{corrected}}(T) = G_{\text{measured}}(T) / (1 + (m \cdot T + c)/100) \quad (6)$$

補正されたゲイン誤差は次のとおりです。

$$E_{\text{corrected}}(T) = \frac{G_{\text{corrected}}(T) - G_{\text{nominal}}}{G_{\text{nominal}}} \cdot 100 \quad (7)$$

図 3-3 は、従来の方法を用いて 24V および 48V の電源で DRV8376 のキャリブレーション済みゲイン誤差を示しています。

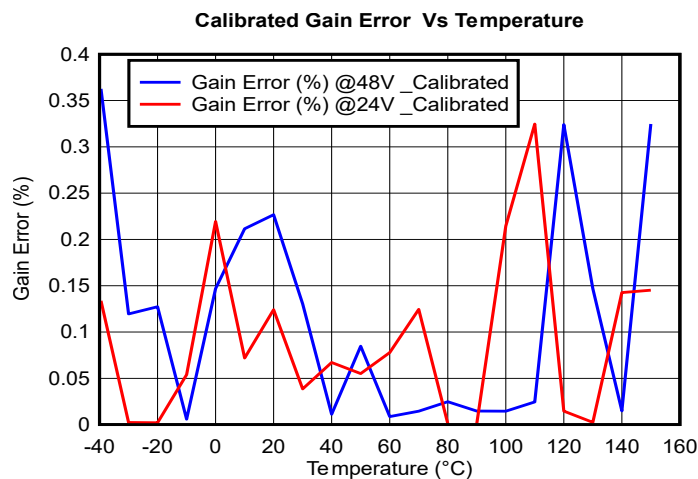


図 3-3. キャリブレーション済みゲイン誤差

## 4 まとめ

DRV8376 統合型ローサイド電流検出アンプは、BLDC モーターアプリケーションにおける正確な電流監視のための設計を提供し、堅牢な過電流保護、トルク制御、および整流を実現します。室温、マルチ温度、自己キャリブレーション、ソフトウェアベースの補正といったキャリブレーション手法によって、ゲイン誤差や温度ドリフトといった課題に対処することで、エンジニアは広い温度範囲にわたって高い測定精度を実現できます。senseFET ベースのアーキテクチャは、適応型オフセットキャリブレーションおよびプログラム可能なゲインと組み合わせることで、性能を向上させながら BOM コストと PCB スペースを削減します。推奨されるファームウェアおよび PCB レイアウト戦略の実装は、自動車や産業用システムなどの要求の厳しい環境での動作向けに設計されています。このアプリケーションノートは、精密モーター制御アプリケーションにおいて DRV8376 の性能を最大限に引き出すための実用的なツールをエンジニアに提供します。

## 5 参考資料

- テキサス・インスツルメンツ、『[DRV8376 3 相統合 FET モータードライバ](#)』データシート。

## 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

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、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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月