

Application Note

MCF83xx - 開ループから閉ループへのハンドオフ調整

Jangamreddy Rajasekhar Reddy, Shubham Tapdia

概要

MCF83xx ファミリのデバイスは、住宅用ファン、天井ファン、ウォーター ポンプ、掃除機などのアプリケーション用の BLDC モーターを駆動するお客様向けに、シングル チップでコードフリーのセンサレス FOC 設計を提供します。BLDC モーターは、起動前、起動、開ループ、閉ループ、モーター停止など、さまざまなスピン段を経ます。これらの各段では、毎回モーターを確実にかつ効率的にスピンさせるためのチューニングが必要になります。このアプリケーション ノートは、BLDC モーターの開ループから閉ループへの遷移に影響を及ぼす構成を文書化し、さまざまな動作条件にわたって信頼性の高い遷移を実現できるようにこれらの構成を調整する実験的な手法を提示します。

このドキュメントでの例は MCF8316C で示しています。ただし、このドキュメントは以下の各デバイス (このドキュメントでは MCF83xx デバイスと呼びます) に適用されます。

- MCF8315A
- MCF8315C
- MCF8315C-Q1
- MCF8316A
- MCF8316C
- MCF8316C-Q1
- MCF8315D
- MCF8316D
- MCF8329A
- MCF8329A-Q1

目次

1 はじめに.....	2
1.1 開ループとハンドオフ段.....	2
2 開ループから閉ループへのハンドオフに影響を与える EEPROM 構成.....	3
3 開ループから閉ループへのハンドオフの調整.....	4
3.1 開ループとハンドオフ段を調整する実験的方法.....	4
4 最適なハンドオフ.....	9
4.1 推奨設定での開ループ時間.....	9
4.2 最適なハンドオフ手順に従った開ループ時間.....	9
5 まとめ.....	11
6 参考資料.....	11

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

MCF83xx は、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) アルゴリズムを搭載した、テキサス インストルメンツの BLDC モータードライバファミリの 3 相 BLDC モータードライバです。MCF83xx は、BRAKE、DRVOFF、DIR、EXT_CLK、EXT_WD、SPEED/WAKE ピンによってモーターの動作とシステムを制御でき、DACOUT1、DACOUT2、FG、nFAULT、SOX ピンによってシステム変数、速度、フォルト、位相電流フィードバックを監視するための信号も出力します。

MCF83xx デバイスは、さまざまなスピン段で BLDC モーターをスピンさせることができ、信頼性と制御された動作を実現します。図 1-1 に、BLDC モーターがスピンする各段を示します。

モーターのスピンは、ISD / BRAKE / Hiz コマンドを適用することで、起動前状態から開始されます。次に、モーターはモーターの起動状態に遷移して、初期位置を推定します。次に、モーターが速度と角度を推定するのに十分な逆起電力を発生させるまで、モーターは定電流の開ループで動作します。その後、モーターは閉ループ動作に移行します。停止コマンドを受信すると、モーターは設定された停止オプションに切り替わり、制御された方法で停止します。

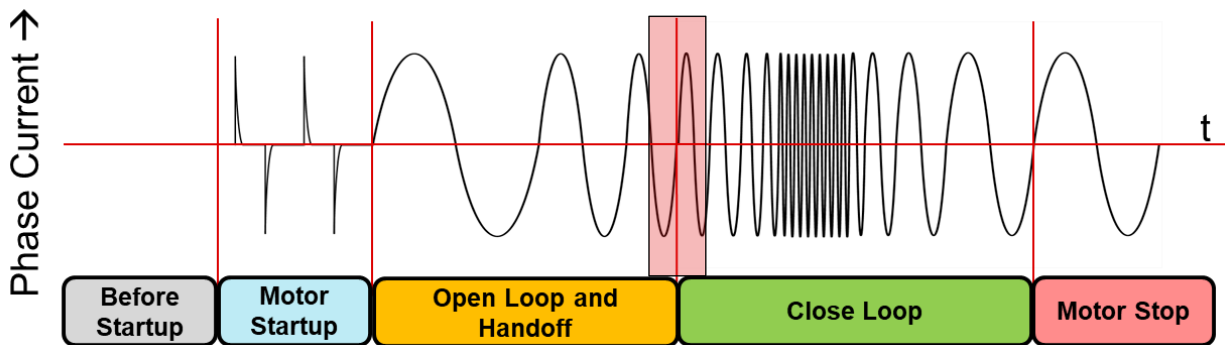


図 1-1. BLDC モーターのスピン段

1.1 開ループとハンドオフ段

モーター起動段でのモーターの初期位置を検出した後、MCF83xx は、式 1 で求められた任意の時点での速度リファレンスを使用して、開ループでモーターを加速します。開ループ加速度係数 (A1 と A2) はそれぞれ OL_ACC_A1 と OL_ACC_A2 によって設定されます。開ループの電流制限値は OL_ILIMIT によって設定されます。モーター位相電流のピーク値を OL_ILIMIT に制限することで、開ループでモーター速度が上昇します。開ループ動作の機能は、逆起電力オブザーバが回転子の位置を正確に検出できるように、モーターが十分な BEMF を生成する速度までモーターを駆動することです。

$$Speed = (A1 \times t) + (0.5 \times A2 \times t^2) \quad (1)$$

モーターの角度と速度を逆起電力オブザーバが推定するのに十分な速度にモーターが達すると、MCF83xx は閉ループ状態に遷移します。開ループから閉ループへの遷移をハンドオフと呼び、この遷移が発生する速度をハンドオフ速度と呼びます。AUTO_HANDOFF_EN が 1b に設定されている場合、このハンドオフ速度は、逆起電力とモーター速度の測定値に基づいて自動的に決定されます。また、OPN_CL_HANDOFF_THR を設定し、AUTO_HANDOFF_EN を 0b に設定することで、ハンドオフ速度を手動で設定することもできます。ハンドオフポイントでの θ 誤差 ($\theta_{gen} - \theta_{est}$) は、閉ループへのスムーズな遷移を実現し、速度過渡を防止するために、THETA_ERROR_RAMP_RATE によって設定されたランプレートによる遷移後、直線的に低下します。

2 開ループから閉ループへのハンドオフに影響を与える EEPROM 構成

表 2-1. 開ループから閉ループへのハンドオフに影響するパラメータ

シリアル番号	設定パラメータ	概要
1	OL_ILIMIT	開ループ電流制限値
2	OL_ACC_A1	開ループ加速度係数 A1 (Hz/sec)
3	OL_ACC_A2	開ループ加速度係数 A2 (Hz/sec^2)
4	OPN_CL_HANDOFF_THR	開ループから閉ループのハンドオフ スレッシュホールド (MAX_SPEED の %)。AUTO_HANDOFF_EN = 0h の場合、ハンドオフが発生する速度。
5	AUTO_HANDOFF_MIN_BEMF	ハンドオフの前に必要な最小 BEMF。AUTO_HANDOFF_EN = 1h の場合、ハンドオフ速度はモーターの逆起電力に依存。
6	THETA_ERROR_RAMP_RATE	ハンドオフ後に θ 誤差 (開ループ θ と推定 θ の差) を直線的に低減するためのランプ レート。
8	CL_SLOW_ACC	θ 誤差がゼロでないときの閉ループ加速度。

注

選択されたデバイスでビット フィールドの構成が可能な場合、TI では OL_ILIMIT_CONFIG を 0b に設定することを推奨します。

3 開ループから閉ループへのハンドオフの調整

開ループとハンドオフ段を調整することは、閉ループで BLDC モーターを高い信頼性で動作させるうえで重要な要素です。デバイスは、閉ループに遷移する前に、モーターの逆起電力と回転子の位置を高精度で検出する必要があります。スムーズなハンドオフのために、以下の点が満たされていることを確認してください。

1. 開ループの終了時点までに、モーター速度とモーター角度を高精度で推定するには、モーターの逆起電力が十分である必要があります。
2. 開ループの終了時点までに、閉ループへスムーズに遷移させるためには、内部の速度リファレンスに追従するモーター速度が必要です。
3. ハンドオフ後、モーター角度 (θ) の誤差を適切に小さくする必要があります。

3.1 開ループとハンドオフ段を調整する実験的方法

3.1.1 ステップ1: 初期構成

1. 開ループ OL_ILIMIT を $0.5 \times (\text{定格モーター ピーク位相電流})A$ に設定します。
2. MAX_SPEED 構成でモーターの最大速度を設定し、次に OPN_CL_HANDOFF_THR を 20% に設定します。
3. OL_ACC_A1 を $(\text{MAX_SPEED}/10)\text{Hz/s}$ に等しくなるように設定し、OL_ACC_A2 をゼロに設定します。
4. DACOUT1 ピンと DACOUT2 ピンを使って、8/8 スケーリング (バイポーラ) で MCF83xx の DAC の SPEED_FDBK および SPEED_REF_OPEN_LOOP 変数をプロットし、それらをオシロスコープにプローブします。

MCF83xx デバイスに速度コマンドを与え、モーター速度 (FG_TRACK)、モーター位相電流 (OUTA)、SPEED_FDBK、SPEED_REF_OPEN_LOOP 変数の動作をキャプチャします。SPEED_FDBK が、開ループ終了までに、開ループ時間の少なくとも 30% において、SPEED_REF_OPEN_LOOP を追従しているかどうかを観測します。これにより、チェックポイント 1 と 2 が満たされていることが確認されます。

MOTOR1: 定格電流 = 1A、最大速度 = 300Hz。図 3-1 は適切なハンドオフを示します。

注

パターン FG_TRACK は、FG 出力信号 (C1) の周波数を追従する、数学的に計算された信号です。

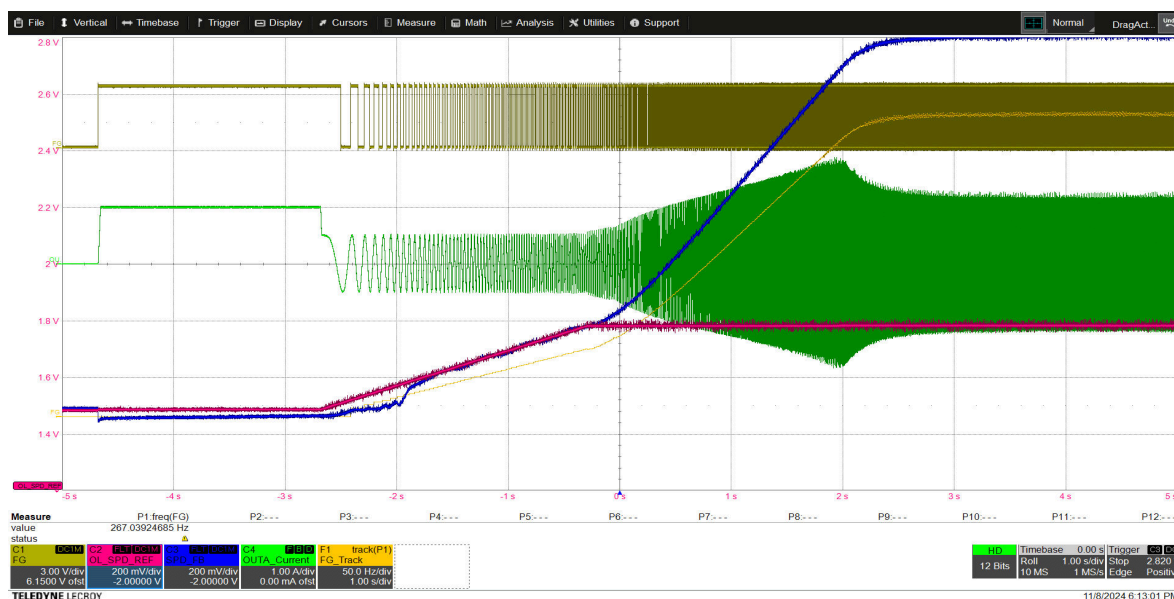


図 3-1. 適切なハンドオフ - OL_ILIMIT = 0.5、OL_ACC_A1 = 25Hz/sec、OPN_CL_HANDOFF_THR = 20%

この動作が確認できない場合は、ステップ 2 に進んで、モーターの動作に基づいて調整すべきパラメータと調整の方向を把握してください。

3.1.2 ステップ2: ケース ハンドオフのパラメータの調整が正しくない

3.1.2.1 OL_ILIMIT の調整

OL_ILIMIT を $(0.5 \times \text{定格電流})A$ に設定すると、一部のモーターの慣性が大きくなるため、ハンドオフが適切に行われな
ない場合があります。このようなシナリオでは、モーターの定格ピーク電流まで、OL_ILIMIT を段階ごとに増加させます。

MOTOR2: 定格電流 0.5A、最大速度 250Hz。図 3-2 は、セクション 3.1.1 の設定 ($A1 = 25\text{Hz/sec}$ 、ハンドオフ速度 = 20%) ではハンドオフが適切に行われなことを示しています。

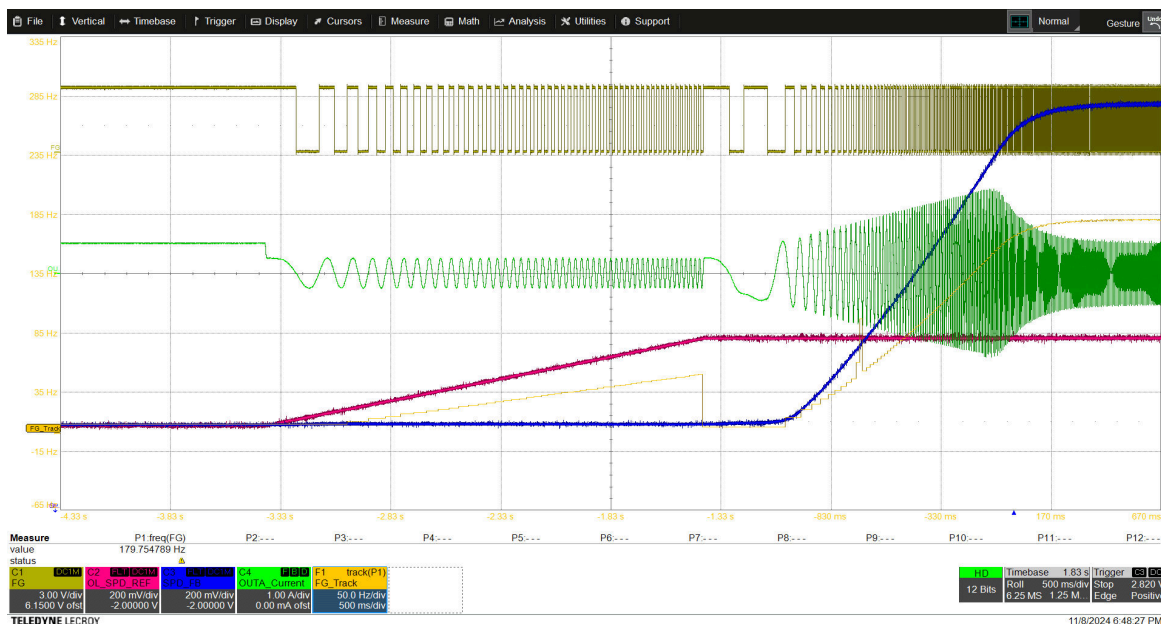


図 3-2. OL_ILIMIT = 0.25A の場合、ハンドオフに失敗する

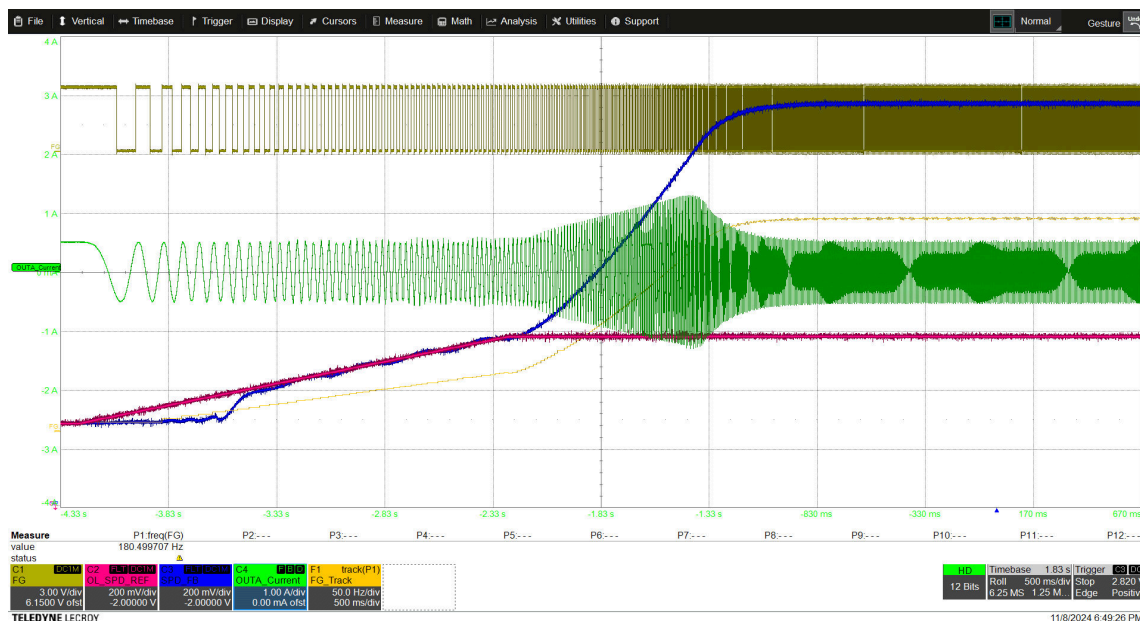


図 3-3. OL_ILIMIT = 0.5A の場合、ハンドオフが適切に行われる

3.1.2.2 開ループ加速係数 A1 の調整

OL_ILIMIT を増やしても速度帰還が開ループ速度リファレンスに到達できない場合、開ループ A1 を下げる必要があります。さらに、OL_ACC_A1 を $(\text{MAX_SPEED}/10)\text{Hz/s}$ に維持することを推奨します。

MOTOR1 の推奨設定は 50Hz/sec で、これより大きい場合はハンドオフが失敗する恐れがあります。OL_ACC_A1 が大きいと、速度リファレンスが急速に増加し、モーターは与えられた OL_ILIMIT で速度リファレンスを追跡できないため、ハンドオフの障害につながる可能性があります。

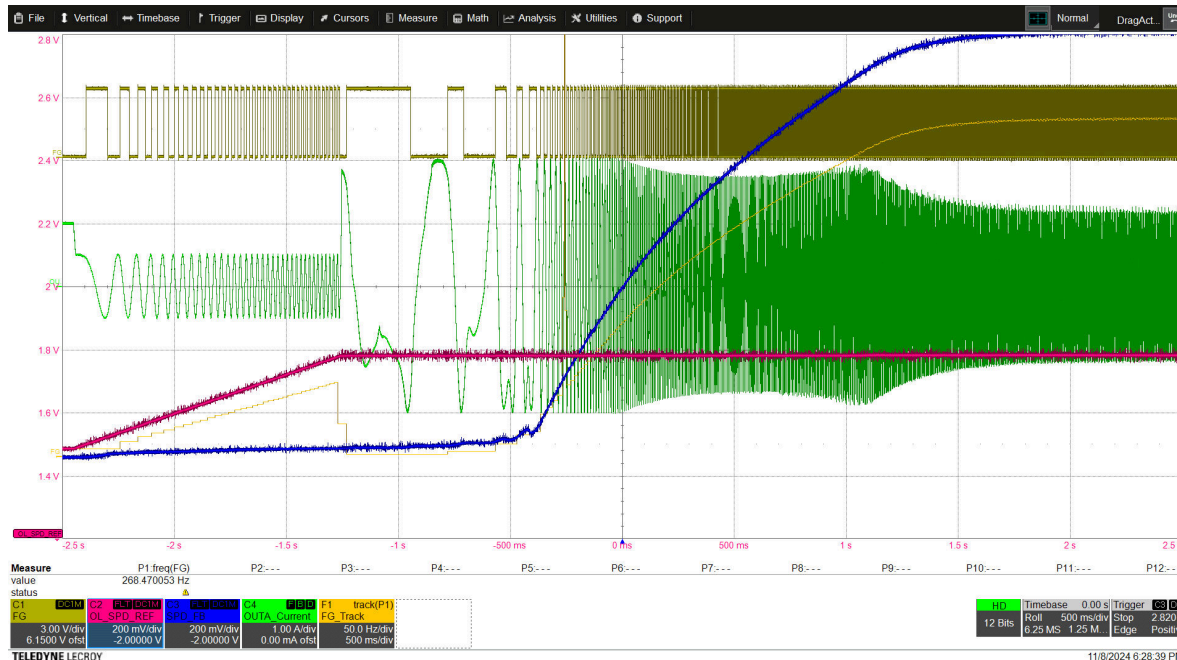


図 3-4. A1 (A1 = 50Hz/sec) 値が高いため、ハンドオフは適切に行われない

注

これまでの 2 つの障害ケースでは、波形は似ています。したがって、まずモーター定格電流まで OL_ILIMIT を増やし、それでもハンドオフが適切でない場合は、ハンドオフが適切になるまで開ループ加速度係数 OL_ACC_A1 を下げます。

3.1.2.3 ハンドオフ スレッシュホールドの調整

設定された OL_ILIMIT では設定速度に達しないことがあるため、OPN_CL_HANDOFF_THR を非常に高い値に設定しないことを推奨します。MOTOR1 の場合、OPN_CL_HANDOFF_THR が 50% に設定されていると、指定された OL_ILIMIT と加速度係数 OL_ACC_A1 ではモーターは最大速度の 50% に達しません。したがって、ハンドオフは失敗します。この場合は、ハンドオフ スレッシュホールドをより低い値に設定してください。

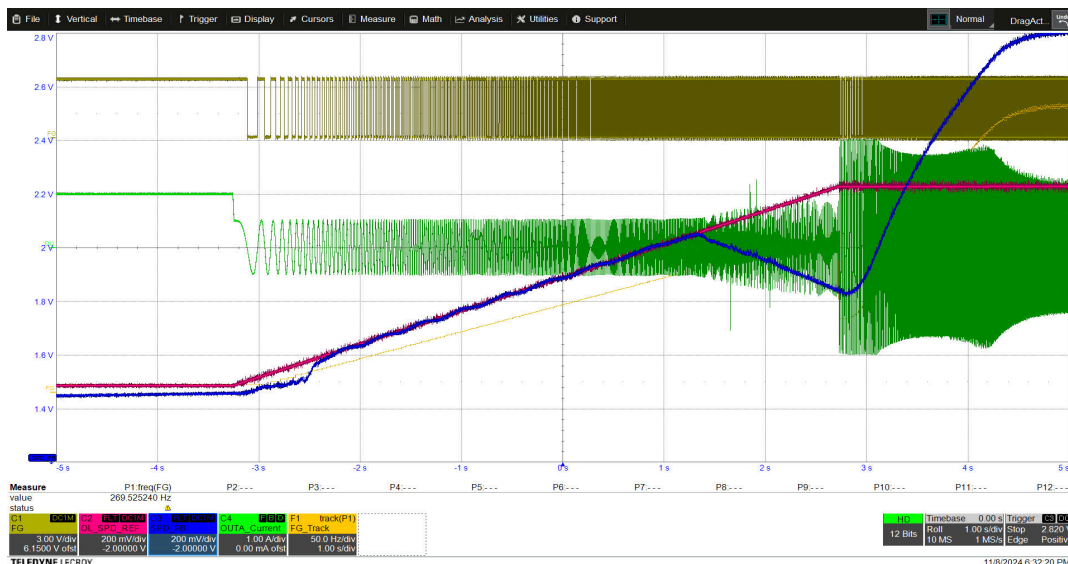


図 3-5. OPN_CL_HANDOFF_THR = 50% でのハンドオフの失敗

3.1.3 ステップ3:ハンドオフ構成の調整

十分な速度で閉ループにハンドオフされた後も、エスティメータが完全にはアラインされていない場合は、 θ 誤差が残る可能性があります。MCF83xx デバイスは、閉ループに遷移する前に、THETA_ERROR_RAMP_RATE のレートでこの θ 誤差をゼロに下げます。この状態は、CLOSED_LOOP_UNALIGNED_STATE と呼ばれます。この状態の速度リファレンスは CL_SLOW_ACC に従います (推奨値は CL_ACC の半分です)。

上記のパラメータは、ハンドオフ状態でより滑らかな位相電流プロファイルを得るように調整する必要があります。これは、開ループ状態後に IQ_REF_CLOSED_LOOP がどのように変化するかに依存し、その変動は THETA_ERROR_RAMP_RATE、CL_SLOW_ACC、SPD_LOOP_KP、SPD_LOOP_KI に依存します。

以下のキャプチャは、ハンドオフ段で THETA_ERROR_RAMP_RATE が IQ_REF_CLOSED_LOOP の変動、ひいては指定された CL_SLOW_ACC、SPD_LOOP_KP、SPD_LOOP_KI の電流プロファイルにどのように影響するかを示しています。IQ_REF_CLOSED_LOOP は、デバイスの DACOUT1 ピンに出力されます。

THETA_ERROR_RAMP_RATE = 111b の場合、IQ_REF_CLOSED_LOOP はより速いレートで変動し、モーター位相電流でより多くの発振が観測されます。

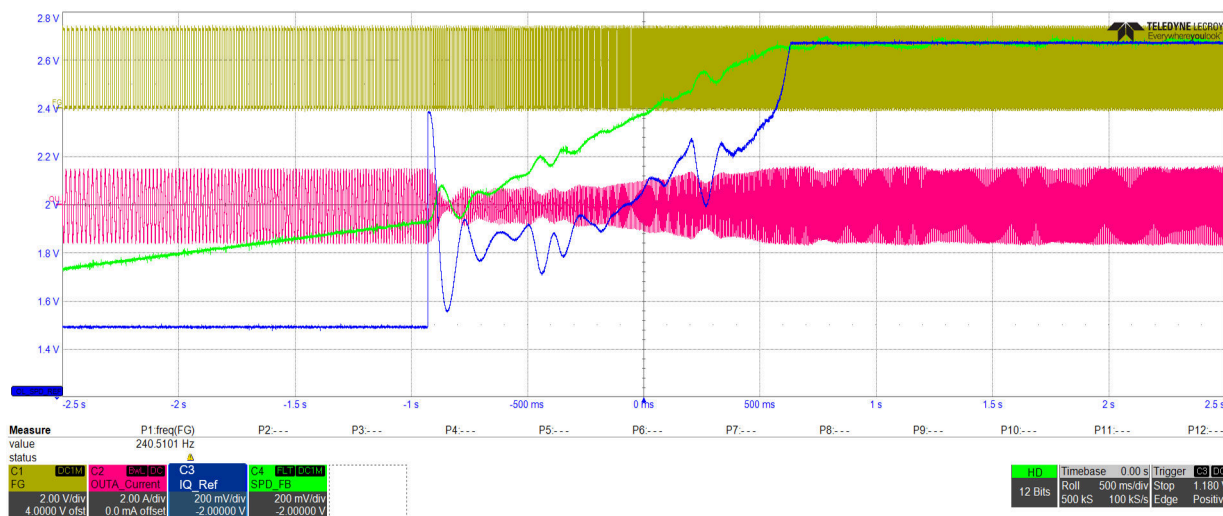


図 3-6. THETA_ERROR_RAMP_RATE = 111b

THETA_ERROR_RAMP_RATE = 000b の場合、IQ_REF_CLOSED_LOOP は低速で変動し、モーター位相電流で発振の減衰が観測されます。

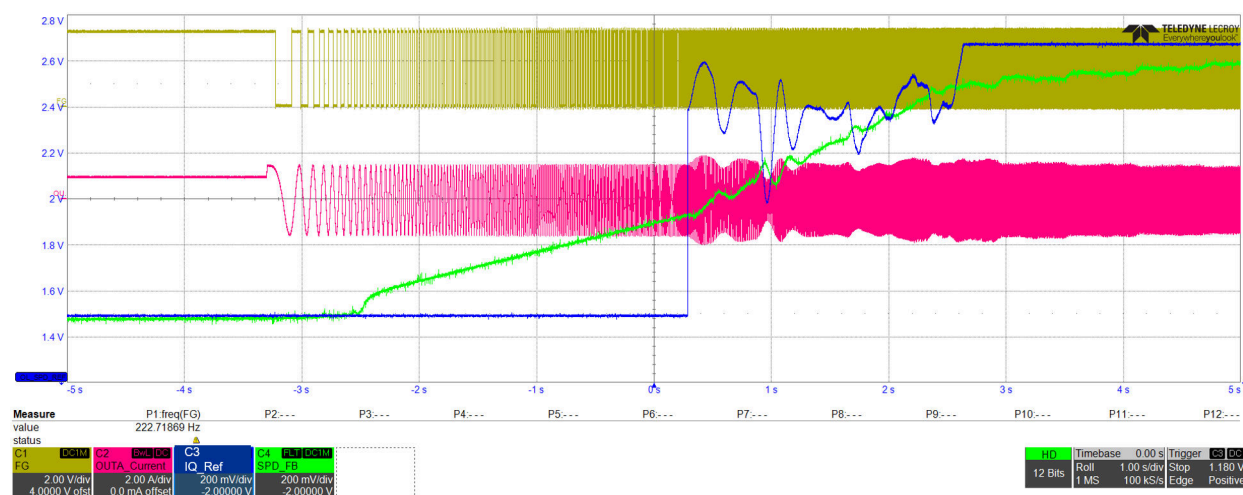


図 3-7. THETA_ERROR_RAMP_RATE = 000b

注

THETA_ERROR_RAMP_RATE の推奨設定は 100b です。この設定を大きくすると、ハンドオフ時点の IQ_REF_CLOSED_LOOP の変動が速くなり、この設定を小さくすると、ハンドオフ時点の IQ_REF_CLOSED_LOOP の変動が遅くなります。

4 最適なハンドオフ

最適なハンドオフ (開ループでの最短時間) が必要な場合は、次の手順を実行します。

- 適切なハンドオフを実現し、(温度による) モーター位相抵抗 / 位相インダクタンスの変動に対応するために、DAC の変数 `SPEED_REF_OPEN_LOOP` および `SPEED_FDBK` が開ループ時間の 30% に対して一致する必要があります。
- `OL_ILIMIT` を、定格ピーク位相電流または `ILIMIT` に設定します。
- `OL_ACC_A2 = 0` (または利用可能な最小設定) にします。`OL_ACC_A1` を、 $\text{OL_ACC_A1} = (\text{MAX_SPEED} / 10) \text{Hz/s}$ の次に大きい値に設定します。ハンドオフが適切かどうかを確認します。ハンドオフが適切でない場合は、前の設定に戻します。そうでない場合は、`OL_ACC_A1` を次に高い値に設定して、この手順を続行します。
- ここで `OL_ACC_A1` を最後に成功したハンドオフ設定の半分に設定します。次に、成功するまで `OL_ACC_A2` の値を増やしてみます。
- `OPN_CL_HANDOFF_THR` を、20% より大きい次の値に設定します。ハンドオフが適切かどうかを確認します。ハンドオフが適切でない場合は、前の設定に戻します。そうでない場合は、`OPN_CL_HANDOFF_THR` を次に高い値に設定して、この手順を続行します。

4.1 推奨設定での開ループ時間

MOTOR3: 定格電流 = 2A、最大速度 = 300Hz

`OL_ILIMIT` = 1A、`OL_ACC_A1` = 25Hz/s (30Hz/s 構成がないため)、`OL_ACC_A2` = 0Hz/s²、`OPN_CL_HANDOFF_THR` = 20%

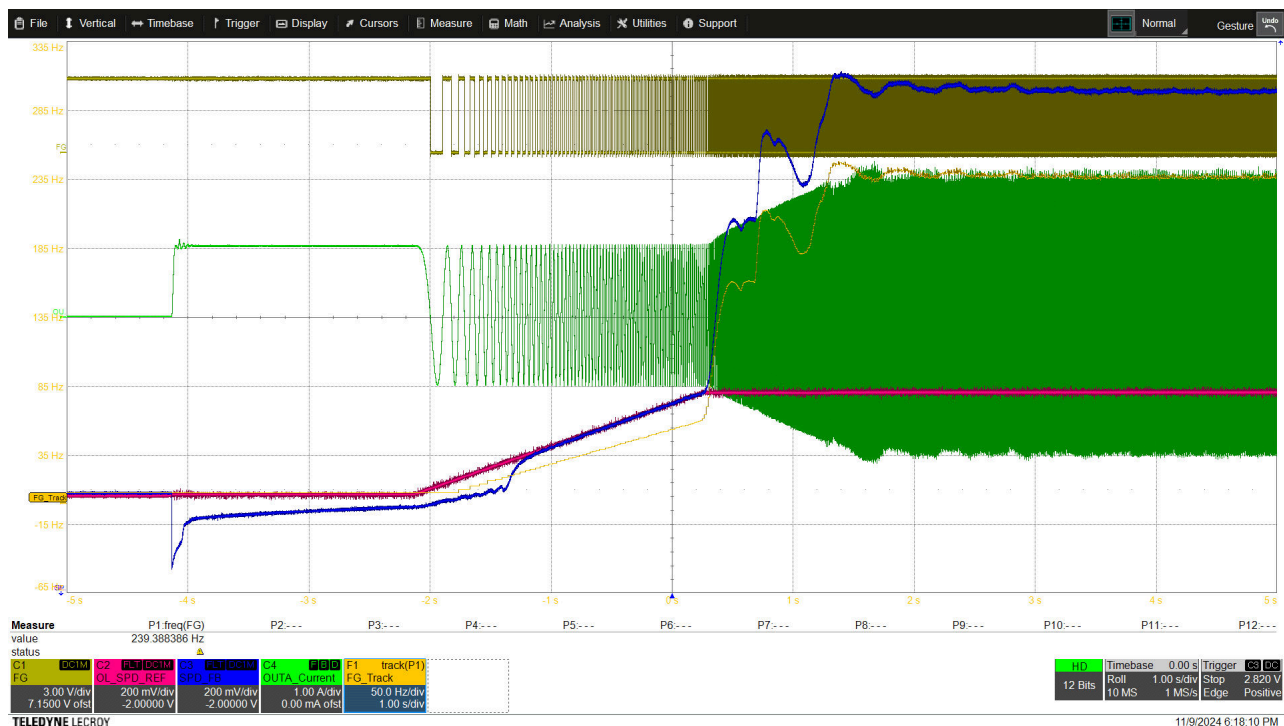


図 4-1. 推奨設定の開ループ時間

図 4-1 から、開ループ時間は約 $1\text{s} \times 2.4\text{div} = 2.4\text{s}$ となります。

4.2 最適なハンドオフ手順に従った開ループ時間

MOTOR3: 定格電流 = 2A、最大速度 = 300Hz

セクション 4 に示す最適なハンドオフ手順を実行した後、MOTOR3 の以下の設定が導き出されます(他のモーターでは異なる場合もありますが、手順は同じです)。

OL_ILIMIT = 2A、OL_ACC_A1 = 50Hz/s、OL_ACC_A2 = 25Hz/s²、OPN_CL_HANDOFF_THR = 18%

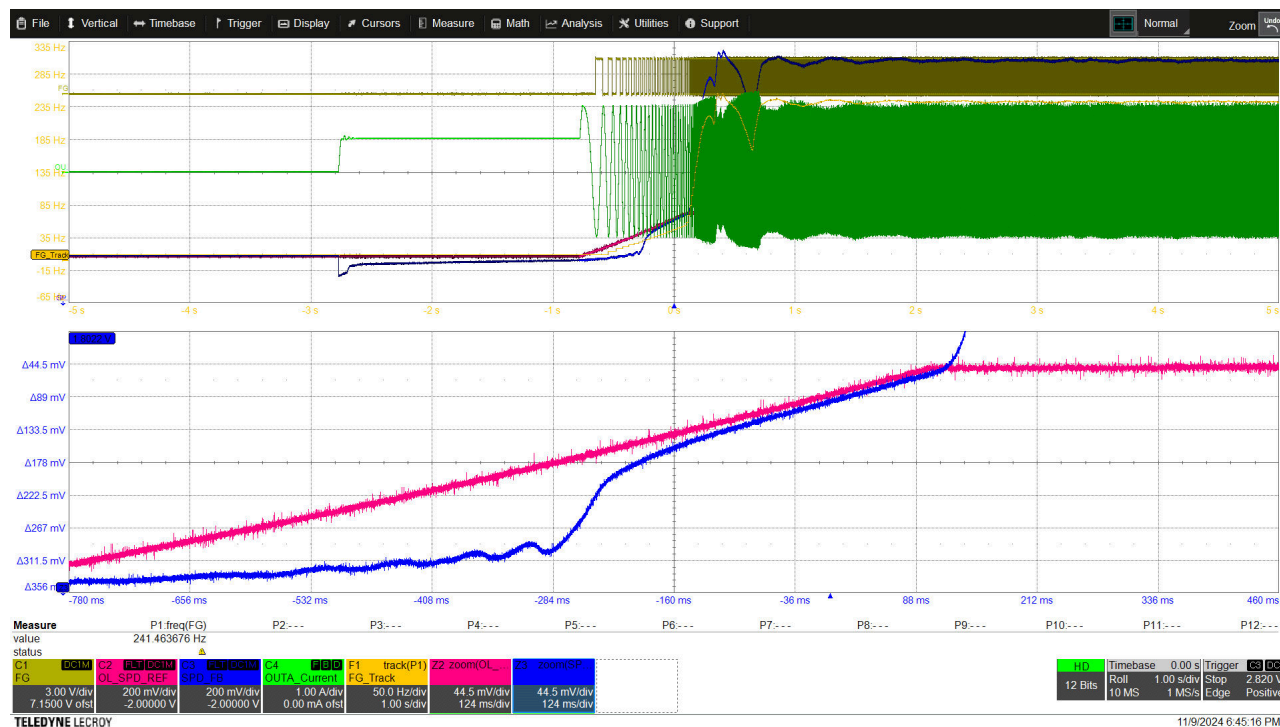


図 4-2. 最適なハンドオフ手順に従った開ループ時間

図 4-2 から、開ループは約 $1s \times 0.9\text{div} = 0.9s$ となり、図 4-1 の開ループ時間 (2.4s) よりも短くなります。

5 まとめ

このアプリケーション ノートでは、MCFx デバイスを使用した BLDC モーターのスピンに関連する各段について紹介しました。次に、開ループから閉ループへのパスオフ遷移段と、ハンドオフ段を調整するための構成について説明しました。このドキュメントでは、構成に影響する各パラメータについてさらに説明し、各構成がハンドオフに与える影響を実験的に説明し、信頼性の高い開ループから閉ループへの遷移を実現するために構成を調整する実験的な方法を示しました。

6 参考資料

- テキサス インストルメンツ、[MCF8316C FET 内蔵、センサレス フィールド オリエンテッド コントロール \(FOC: 磁界方向制御\) BLDC 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

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