

## Application Note

**MSPM0 と TRIAC に基づく低コスト AC モーター制御設計**

Zoey Wei, Yahui Zhang

**概要**

このアプリケーション ノートでは、8 ピン パッケージの低コストのマイコンである MSPM0C1104 と TRIAC を使用して、AC モーター制御におけるコスト効率を実現しています。

本設計の主な特長は以下のとおりです：

- 220V 商用電源で最大出力 900W
- 入力電圧範囲: 90 ~ 265VAC、50/60Hz
- 過電流保護
- ソフト スタートをサポートします
- 速度変更に対応
- 基板に電源が供給されていることを示す RUN LED

ソフトウェアとハードウェア回路図のリソースは、[こちら](#)でダウンロードできます。

**目次**

<b>1 概要</b> .....	2
<b>2 ブロック図</b> .....	3
2.1 電源モジュール.....	3
2.2 ゼロ交差検出 (ZCD).....	3
2.3 電流検出.....	4
2.4 MSPM0 マイクロコントローラ.....	5
2.5 TRIAC.....	5
<b>3 位相角度制御</b> .....	6
3.1 動作原理.....	6
3.2 境界条件と特殊な場合.....	6
3.3 MSPM0 を使用した 実装.....	7
<b>4 ソフトスタート機能</b> .....	8
<b>5 ソフトウェア</b> .....	9
5.1 ソフトウェア ワークフロー.....	9
5.2 ゼロ交差検出の実装.....	10
5.3 パルス生成.....	10
5.4 目標速度の更新.....	10
5.5 過電流保護.....	10
5.6 ユーザー システムの定義.....	10
<b>6 結果</b> .....	12
6.1 スコープ波形.....	12
6.2 速度変更.....	13
6.3 ソフト スタート.....	17
6.4 温度.....	18
<b>7 まとめ</b> .....	19
<b>8 参考資料</b> .....	19

**商標**

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 概要

掃除機、ブレンダー、電動工具などの最新の家庭用機器では、シンプルなスイッチング機構を維持しながら、効率的な速度制御設計が一層求められています。TRIAC は、110/240V の商用電源に直接対応できる最も経済的な電力スイッチング部品の一つであり、コスト重視のモーター用途で好まれています。これらのシステムはマイコン (MCU) と統合されることで、状態監視、動的な速度制御、過電流保護などのインテリジェントな機能を備えるようになります。

TI の MSPM0 マイコンシリーズは、豊富なペリフェラルの統合により、このアプリケーションにおいて高いコスト効率を実現します。この記事では、MSPM0 と TRIAC を組み合わせることで、低コストな AC モーター制御を実現する方法について説明します。

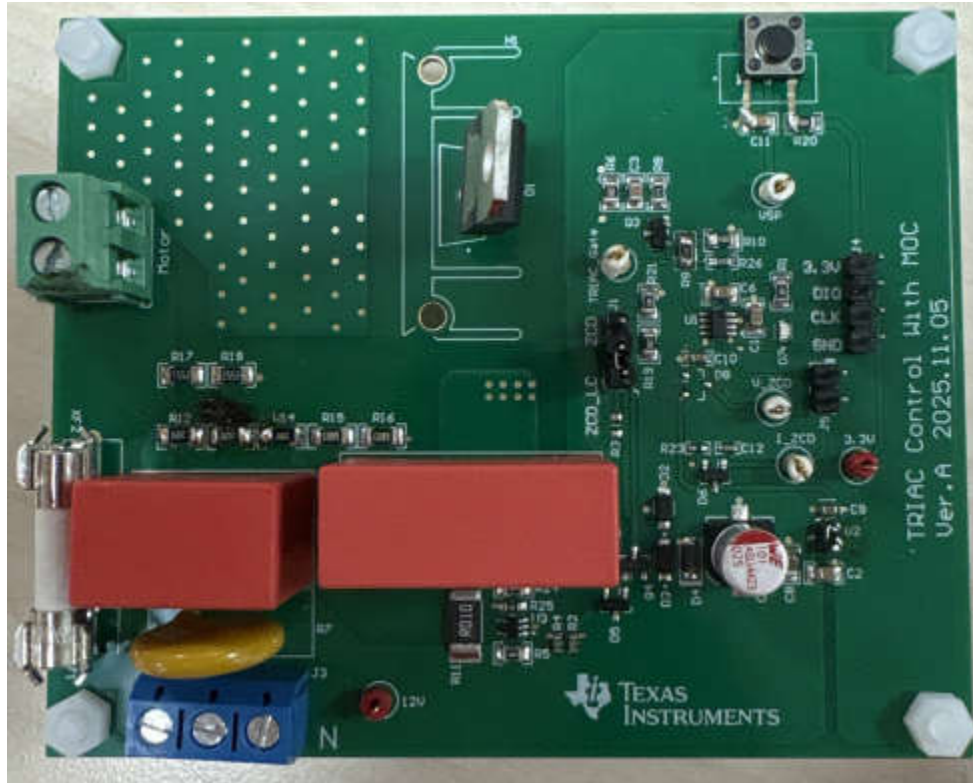


図 1-1. 評価ボード

## 2 ブロック図

図 2-1 は、AC モーター用途向け MSPM0 ベースの TRIAC 制御設計のシステムブロック図における 6 つの主要機能を示しています。AC 電源は電圧モジュールを介して MSPM0 に供給され、3.3V が生成されます。MSPM0 はコア処理モジュールとして、電流および電圧を検出し、TRIAC を駆動するためのゲート駆動信号をリアルタイムで同期して出力します。

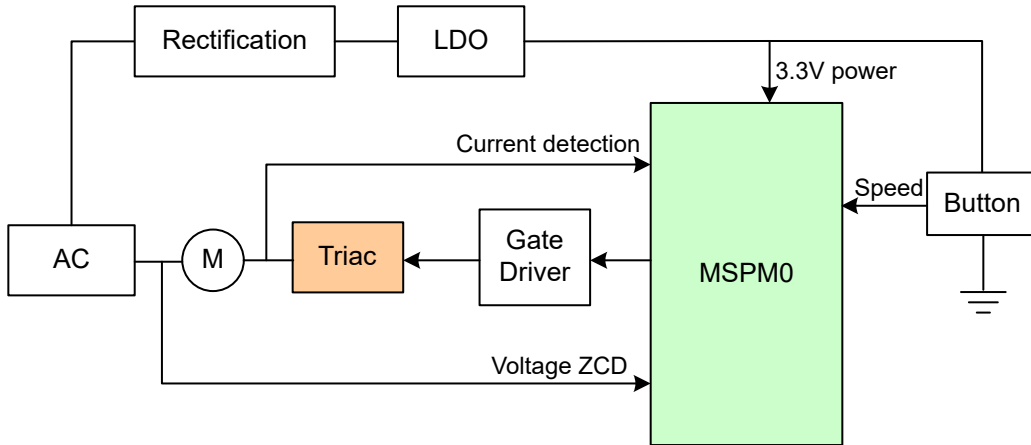


図 2-1. システム ブロック図

### 2.1 電源モジュール

AC 商用電源入力 (90 ~ 265VAC、50/60Hz) は、ツェナー ダイオードに接続した整流回路を経由して、安定した 12V DC 電源に変換されます。MSPM0 および関連する制御回路に電源を供給するために、本設計では LDO を使用して 12V を 3.3V に変換し、広い入力電圧範囲にわたって安定した動作を確保しています。

この設計は、シンプルさ、コスト効率、および高電圧領域と低電圧領域間の適切な絶縁を重視しています。

### 2.2 ゼロ交差検出 (ZCD)

ZCD 回路は AC 電源波形との正確な同期を提供し、これは位相角制御を正確に行うために重要です。適切なゼロ交差検出により、マイコンは TRIAC の点弧角を決定できるようになり、精密な電力制御が可能になります。

この設計では、電圧 ZCD を実装します。AC 電流は高抵抗値の抵抗によって制限された後、トランジスタに接続され、AC 基準の正弦波信号を電源のゼロ交差に同期した矩形波へ変換し、クリーンなデジタル 12V 信号をマイコンに供給します。マイコン側では、2 つのクランプ ダイオードによって入力信号が 12V からマイコンの割り込み生成に安全な 0 ~ 3.3V の範囲に制限されます。

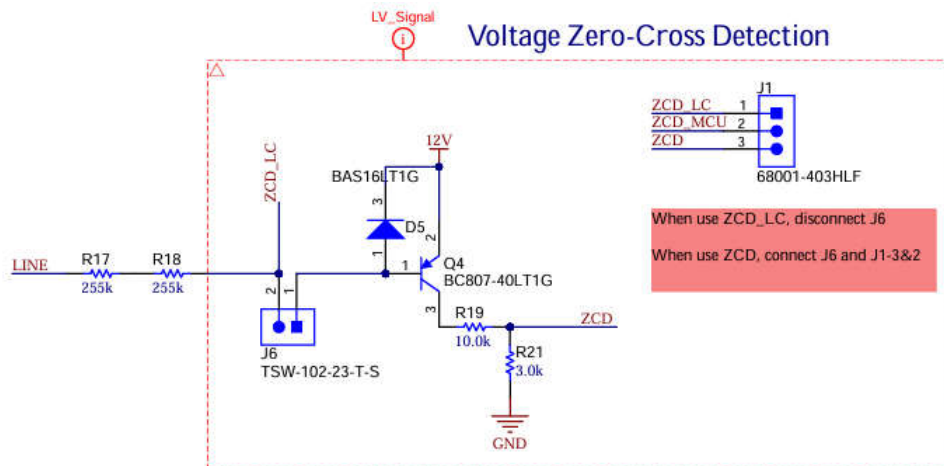


図 2-2. 電圧のゼロ交差検出

代替手段として、本システムはモーター電流検出回路から取得した電流ベースのゼロ交差検出にも対応しています。誘導性負荷ではモーター電流がゼロを交差する際に予測可能な位相シフトがあるため、この方法は信頼性の高い同期を提供します。

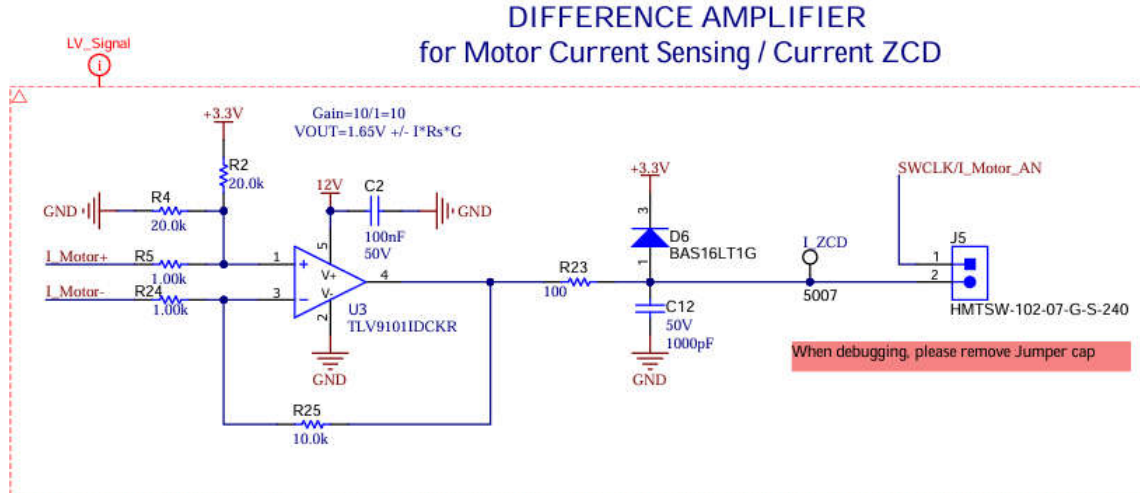


図 2-3. 絶縁型ゼロ交差検出の回路図

## 2.3 電流検出

この設計では、電圧 ZCD 検出を使用します。電流 ZCD 回路を再利用して、リアルタイムで電流状態を監視し、過負荷を防止します。

モーターのリターン経路に低抵抗の高精度シャント抵抗を使用して小さな差動電圧を生成し、それを差動アンプによって単一端子のグラウンドリファレンス信号に変換して検出します。この電圧は、MSPM0 ADC 入力用に 1.05V ~ 2.25V の範囲に設計されています。

MSPM0 は電流信号を継続的にサンプリングし、測定値をプログラム可能な保護スレッショルドと比較します。電流が安全限界を超えると、ファームウェアはモーターおよびパワー半導体を保護するために、TRIAC のトリガを直ちに無効化します。



### 3 位相角度制御

ボタン入力により、ユーザーは TRIAC の点弧角を変更してモーターの速度を調整できます。位相角制御は、TRIAC ベースのアプリケーションにおいて AC モーターの速度を制御するための主要な手法です。

#### 3.1 動作原理

AC ライン電圧は、50Hz では周期 20ms (60Hz では 16.67ms) の正弦波を形成し、正の半周期と負の半周期の 2 つで構成されます。各ゼロ交差時に、TRIAC はオフ状態になります。MSPM0 マイコンはこれらのゼロ交差イベントを検出し、点弧角と呼ばれるプログラム可能な遅延時間の後にゲートトリガパルスを生成します。一度トリガされると、TRIAC はその半周期の残りの間導通し、モーターに電流が流れるようになります。TRIAC は、半周期の終わりに AC 電流が自然にゼロを超えると自動的にオフになります。

点弧角は、モーターに供給される電力を決定します。点弧角が小さいほど、供給される電力は低くなります。

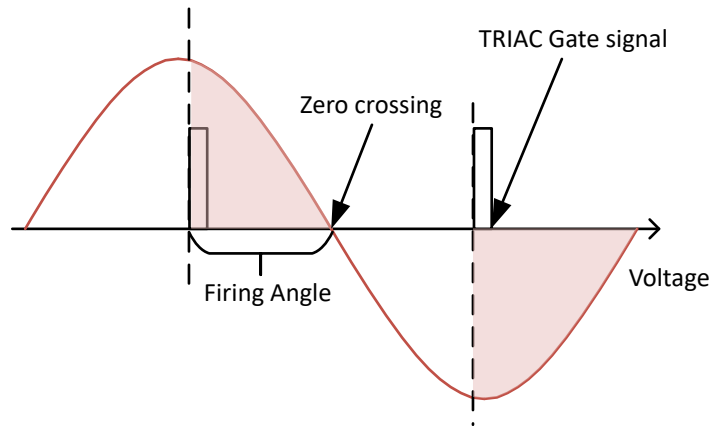


図 3-1. 位相角度制御

#### 3.2 境界条件と特殊な場合

掃除機などの類似機器で使用されるユニバーサル モーターは、非常に誘導性の高い負荷です。誘導性負荷を駆動する場合、電流はモーターのインダクタンスおよび抵抗によって決まる位相角だけ電圧に対して遅れます。この電流の遅れにより、TRIAC は電圧のゼロ交差時にはオフにならず、電流がゼロ交差を通過するまで追加の電気角にわたって導通し続けます。

図 3-2 に示すように、発火角度が  $180^\circ$  に近づくと、前の半周期の電流が完全に消える前に TRIAC をトリガできます。

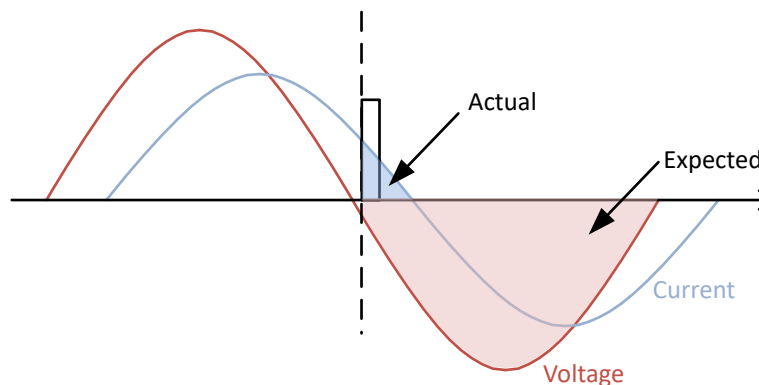


図 3-2. 予期しないスイッチ オフ

この潜在的な問題は、二つの方法で解決できます。一つの方法は、点弧角に近づくにつれて TRIAC のゲートパルスの持続時間を延長する方法です。ゲートパルスは、次の電流ゼロ交差点をまたぐことを保証できる十分な持続時間を持つ必要があり、これにより TRIAC が電流ゼロ交差時にオフにならないことを確認します。

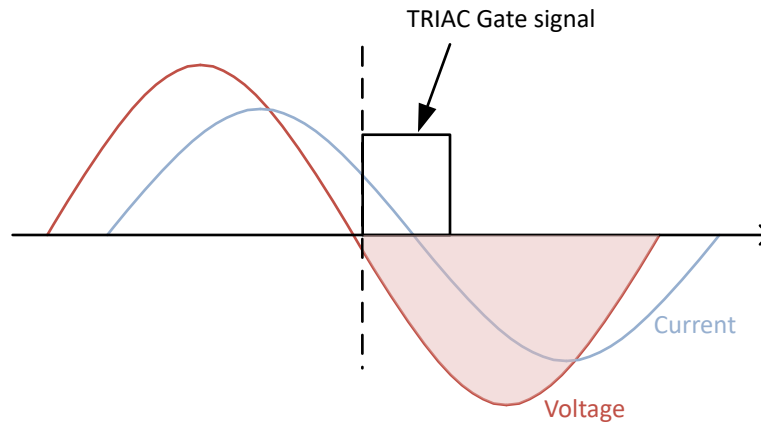


図 3-3. 長パルスによるゲート駆動

もう一つのより簡単な方法は、ファームウェア内で点弧角に境界を設定し、動作を指定された範囲内に制限することです。この方法の制御範囲は、最初の方法ほど広くはありません。ただし、ファームウェア開発は比較的簡単です。現在の設計では、この方法を採用しました。

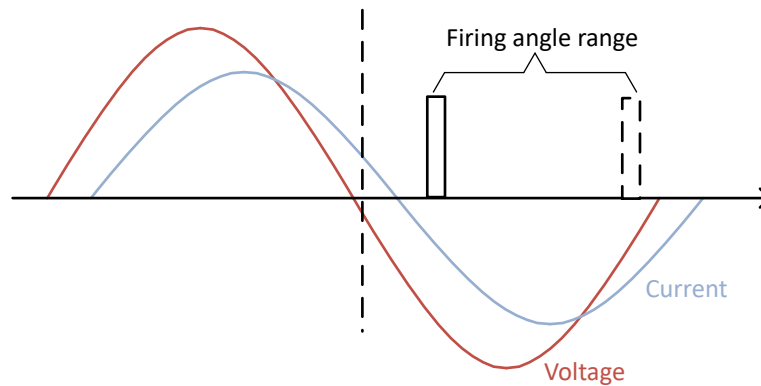


図 3-4. 点弧角の範囲

### 3.3 MSPM0 を使用した 実装

このリファレンス デザインでは、シンプルで直感的なモーター制御を実現するために、三つの離散的な速度レベルを実装しています：

- **高速:** 1000 $\mu$ s の遅延 (約 162° の点弧角) – 最高のモーター速度のための最大出力。
- **中速:** 5000 $\mu$ s の遅延 (約 90° の点弧角) – 中程度の速度に対応する中出力。
- **速度低:** 7000 $\mu$ s 遅延 (約 54° の点弧角) – 最低動作速度の最小消費電力。
- 点弧角の境界設定は 30.6° です。

MSPM0 は、高分解能タイマを使用して、ゼロ交差検出を通じて AC 周期を高精度に測定します。各半周期ごとに、マイコンは直近 2 回の測定値から平均周期を計算し、ライン周波数の変動を補償します。この周期測定値と選択された速度モードに基づいて、制御アルゴリズムは TRIAC をオンにするための 1ms のゲートトリガ パルスを生成するまでの遅延時間を決定します。

## 4 ソフトスタート機能

機械的ストレスを防止し、モーターを起動したときの突入電流を低減するため、この設計はソフトスタートのメカニズムを実装しています。目標の点弧角を即座に適用するのではなく、制御アルゴリズムは大きな遅延 (低出力) から目標の遅延値へと段階的に移行します。遷移は、次の二つのパラメータで定義される制御されたレートで発生します: **UPDATE\_RATE** (2 つのゼロ交差サイクルごと) と **UPDATE\_STEP** (更新により **50 $\mu$ s**)。これにより、スムーズな加速特性が実現され、モーターの寿命が向上するとともに、起動時の騒音が低減されます。

例えば、**SpeedOff (10000 $\mu$ s)** から **SpeedHigh (1000 $\mu$ s)** に移行する場合、遅延は 2 サイクルごとに **50 $\mu$ s** ずつ減少し、**50Hz** のライン周波数では遷移時間は約 **3.6 秒** となります。この段階的なパワーアップは、機械的衝撃を大幅に低減し、システムの信頼性を向上させます。

## 5 ソフトウェア

### 5.1 ソフトウェア ワークフロー

ソフトウェアは、いくつかの主な機能で構成されています:

表 5-1. ファームウェアのメイン API

API	説明
Triac_Init	すべてのペリフェラルを構成し、制御パラメータを初期化します
Triac_ControlLoop	適切なタイミングで TRIAC をトリガするために、必要なすべての計算を実行します
Triac_updateCurDelay	点弧角を更新します
Triac_generatePulse	ゲートドライバパルスを生成します
CAPTURE_0_INST_IRQHandler	タイマ割り込みハンドラ ゼロ交差検出を実現します
GPIOA_IRQHandler	GPIO 割り込みハンドラ ボタンを検出し、速度を変更します
ADC12_0_INST_IRQHandler	ADC 割り込みハンドラ 電流を監視します

図 5-1 はソフトウェアワークフローです。

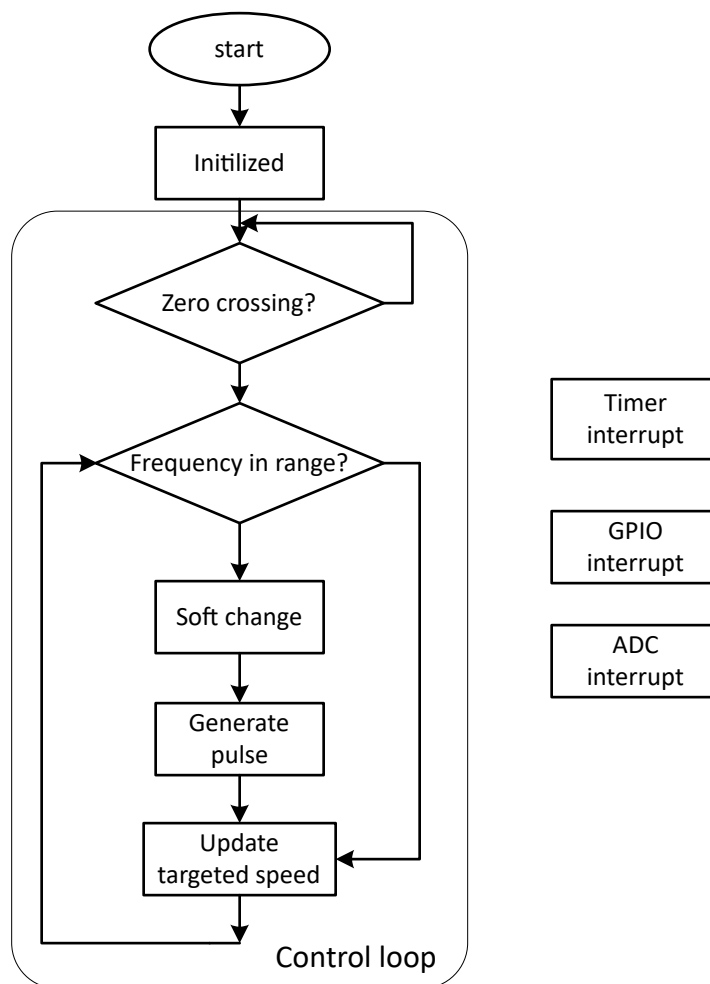


図 5-1. ソフトウェア ワークフロー

## 5.2 ゼロ交差検出の実装

ゼロ交差検出では、キャプチャモードで動作するタイマを使用し、ZCD 入力信号の立ち上がりおよび立ち下りの両エッジでトリガされるように設定されます。割り込みハンドラ (CAPTURE\_0\_INST\_IRQHandler) は、次の三つの異なるイベントを処理します:

- **CC0\_DN (最初の半周期):** 正から負へのゼロ交差時のタイマ値をキャプチャし、最初の半周期の期間を計算します
- **CC1\_DN (二番目の半周期):** 負から正へのゼロ交差時にタイマ値をキャプチャし、二番目の半周期を計算し、同期を維持するためにタイマ カウンタを手動で再ロードします
- **ZERO イベント:** ゼロ交差が検出されないままタイマがゼロに達した場合、同期喪失を示すために `gSynced = false` が設定され、不規則なゲートパルスの生成を防ぎます

キャプチャされた周期値は平均化 (`periodAvg`) され、ライン周波数のわずかな変動やノイズを補償するための堅牢な測定値を提供します。この平均値は、正確な点弧角遅延を計算するための時間基準として使用されます。

## 5.3 パルス生成

`Triac_generatePulse()` 関数は、PWM モードで構成されたワンショット タイマーを使用して、ゲートトリガパルスを生成します。タイマには `currentDelay + PULSE_WIDTH (1ms)` に相当する値がロードされます。ここで、`currentDelay` はパルスの開始タイミングを決定し、`PULSE_WIDTH` はパルスの持続時間を定義します。タイマはパルス生成後に自動的に停止し、省エネルギーな動作が確保されます。

パルス生成は `pulseType` に基づいて条件付きで行われます。`currentDelay` が `DELAY_MIN_POWER_TIME (8300μs)` を超えると、`pulseType` は `noPulse` に設定され、ゲート信号は生成されません。これにより、モーターは実質的にオフになります。このスレッシュホールドは、モーターが失速したり過大な電流を引き込んだりする可能性がある、過度に小さな導通角で TRIAC を動作させることを防ぎます。

## 5.4 目標速度の更新

`GPIOA_IRQHandler` はボタン押下イベントに応答し、`speedMode` 変数を 4 つの状態にわたってインクリメントします: `SpeedOff`、`SpeedLow`、`SpeedMiddle`、`SpeedHigh`。各速度モードは、点弧角を決定する特定の `targetDelay` 値に対応しています。このインターフェイスの循環的な動作 (`SpeedHigh` から `SpeedOff` に戻る) により、ユーザーは一つのボタンで直感的に操作できます。

`Triac_updateCurDelay()` におけるソフトスタート機構は、制御された速度 (`UPDATE_RATE` サイクルごとに `UPDATE_STEP`) で増減させることにより、`currentDelay` を新しい `targetDelay` に向かって滑らかに遷移させます。これにより、機械的ストレスや騒音の原因となる急激な速度変化を防ぐことができます。

## 5.5 過電流保護

`ADC12_0_INST_IRQHandler` は、MSPM0 に内蔵されたウィンドウ コンパレータを使用したハードウェア ベースの過電流保護機構を実装しています。初期化時に、ADC は最大許容電流レベルに対応する高スレッシュホールド (電流検出回路からの `AC_CURRENT_LIMITATION = 3.2V`) で設定されます。検出された電流がこのスレッシュホールドを超えると、ウィンドウ コンパレータが割り込みを生成します。

ISR は、通常動作を停止するためにすべての割り込みを直ちに無効化し (`__disable_irq()`)、それ以上のゲートパルスを防ぐために周期測定値をクリアし、デバッグ用にブレークポイント (`__BKPT(0)`) を発生させます。本番システムでは、このブレークポイントは、ステータス表示、自動リトライ ロジック、またはアプリケーション要件に応じた恒久的なシャットダウンなどを含む、より高度な故障処理ルーチンに置き換えられます。

## 5.6 ユーザー システムの定義

システム構成パラメータは、`system_define.h` ヘッダ ファイルで定義されています。これらのマクロを使用することで、位相角制御の動作、タイミング パラメータ、および保護スレッシュホールドを、特定のアプリケーション要件や AC ライン周波数に合わせてカスタマイズできます。特に明記されていない限り、すべてのタイミング値はマイクロ秒 (`μs`) で指定されています。

デフォルトのタイミング パラメータは、50Hz の AC 電源 (周期 20ms、半周期 10ms) を想定して設計されています。60Hz の AC 電源で動作させる場合 (周期 16.67ms、半周期 8.33ms)、同等の位相角および制御特性を維持するために、タイミング パラメータを比例的に調整する必要があります。

表 5-2. ユーザー定義マクロ リスト

マクロ名	デフォルト値	説明
PULSE_WIDTH	1000 $\mu$ s	TRIAC ゲートトリガパルス幅。TRIAC に印加されるゲート駆動信号の持続時間を定義します。このパルスは、負荷電流が TRIAC ラッチング スレッショルドに達することを確認できる十分な長さである必要があり、特に誘導性負荷の場合に重要です。1ms のパルスにより、ほとんどの動作条件にわたって信頼性の高いトリガが可能です。
VOLTAGE_PERIOD_MAX	12000 $\mu$ s	許容される最大 AC 半周期。異常なライン周波数状態を検出するために、周期検証の上限境界として機能します。50Hz 動作の場合、公称半周期は 10ms です。最大 12ms では 20% の許容誤差が許容されます。
VOLTAGE_PERIOD_MIN	8000 $\mu$ s	許容される最小 AC 半周期。誤ったゼロ交差検出やノイズによる誤トリガを排除するために、周期検証の下限境界として機能します。この 8ms の最小値は、50Hz における公称 10ms の半周期に対して 20% 低い許容範囲を提供します。
AC_INPUT_HALF_PERIOD	10000 $\mu$ s	公称 AC 入力半周期。50Hz では 1 周期は 20ms であり、したがって各半周期は 10ms です。
DELAY_SPEED_HIGH	1000 $\mu$ s	高速動作のための点弧遅延。
DELAY_SPEED_MIDDLE	5000 $\mu$ s	中速作動時の点弧遅延。
DELAY_SPEED_LOW	7000 $\mu$ s	低速運転のための点弧遅延。
DELAY_MIN_POWER_TIME	8300 $\mu$ s	電力スレッショルドの最小遅延。
UPDATE_RATE	2 cycles	ゼロ交差サイクルにおける遅延更新レート。速度遷移中に、currentDelay パラメータが targetDelay に向かってどの程度の頻度で調整されるかを定義します。
UPDATE_STEP	50 $\mu$ s	更新ごとの遅延調整増分。UPDATE_RATE サイクルが経過するたびに、currentDelay はこのステップ サイズ分だけ targetDelay に向かって増加または減少します。
AC_CURRENT_LIMITATION	3.2 V	過電流保護スレッショルド。

## 6 結果

このセクションでは、ユニバーサル モーター負荷で動作する MSPM0 ベースの TRIAC 制御システムから得られた実験結果を示します。これらの測定により、位相角制御の実装が検証され、ソフトスタート機能が実証されるとともに、さまざまな動作条件下における熱特性が評価されています。

### 6.1 スコープ波形

オシロスコープのパターンは、[図 6-1](#) に示すように、ゼロ交差検出信号 (青)、TRIAC ゲート駆動パルス (ピンク)、モーター電流 (緑) の関係を示しています。ゲートパルスは ZCD の立ち上がりエッジからのプログラムされた遅延後に発生し、その後にモーター電流が導通を開始し、次のゼロ交差時にモーターはオフになります。

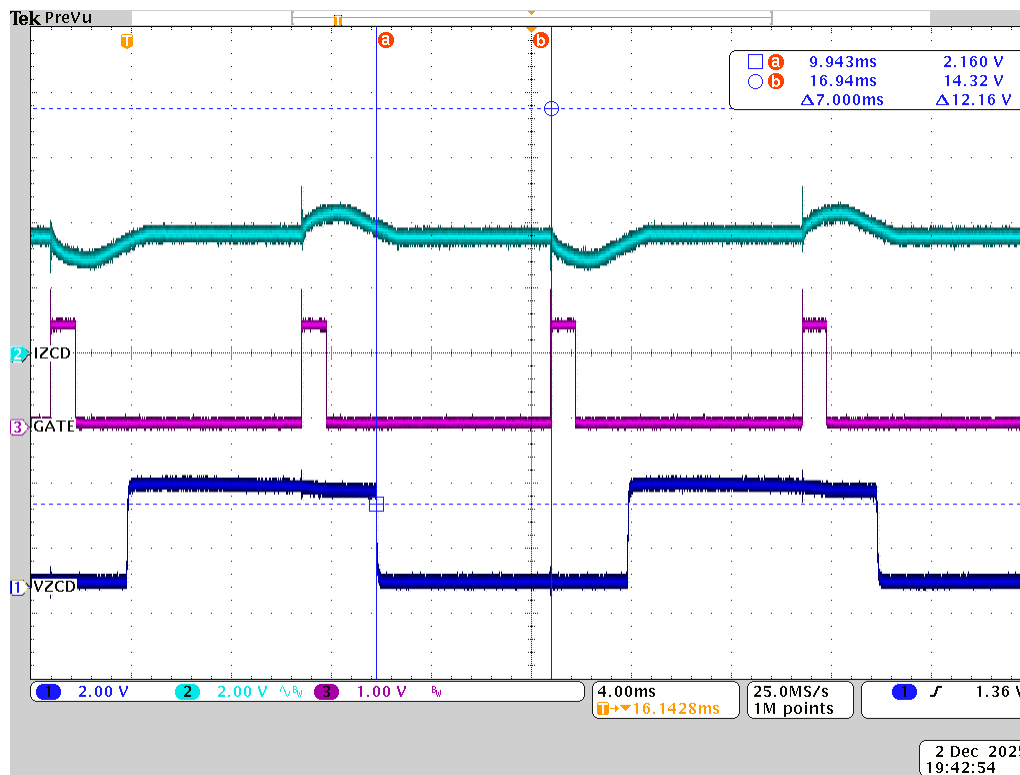


図 6-1. 高速モード時の信号 (青 - ZCD 信号、ピンク - ゲートドライバ信号、緑 - モーター電流)

## 6.2 速度変更

図 6-2 から図 6-7 に、各種速度モードでのゲート信号、ZCD 信号、モーター電流を示します。以下の図から分かるように、低速モードでは位相角が小さく、電流の持続時間は短くなります。一方で、高速モードでは位相角が大きく、電流の持続時間は長くなります。

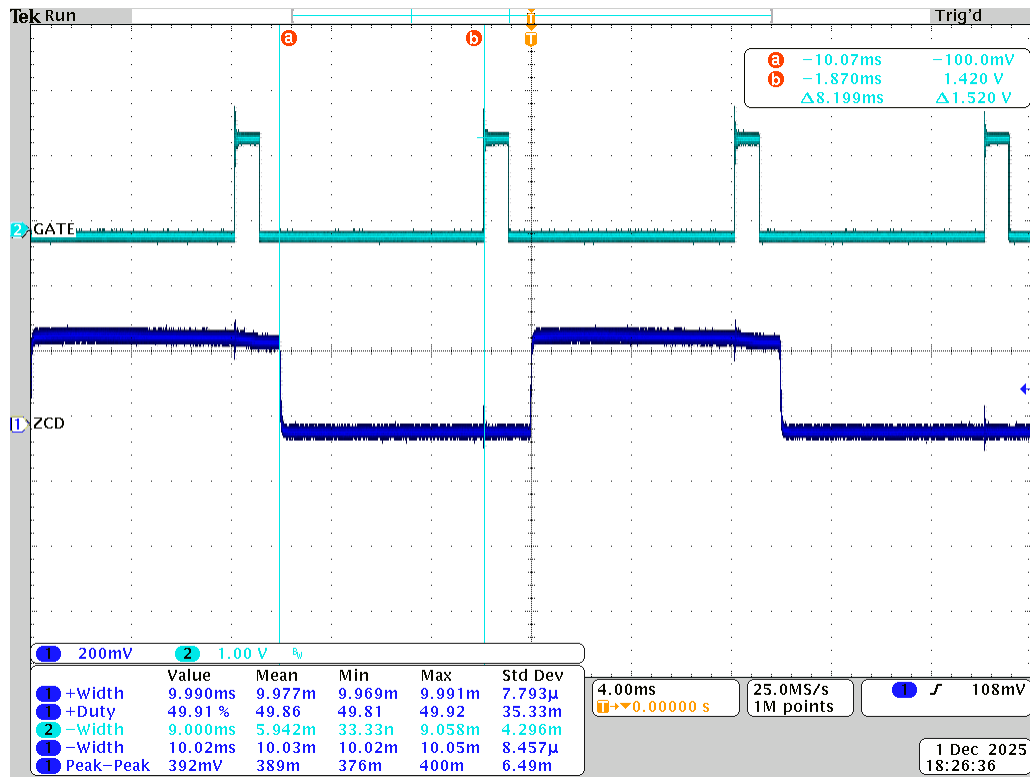


図 6-2. 低速モード時の信号 (青 - ZCD 信号、緑 - ゲートドライバ)

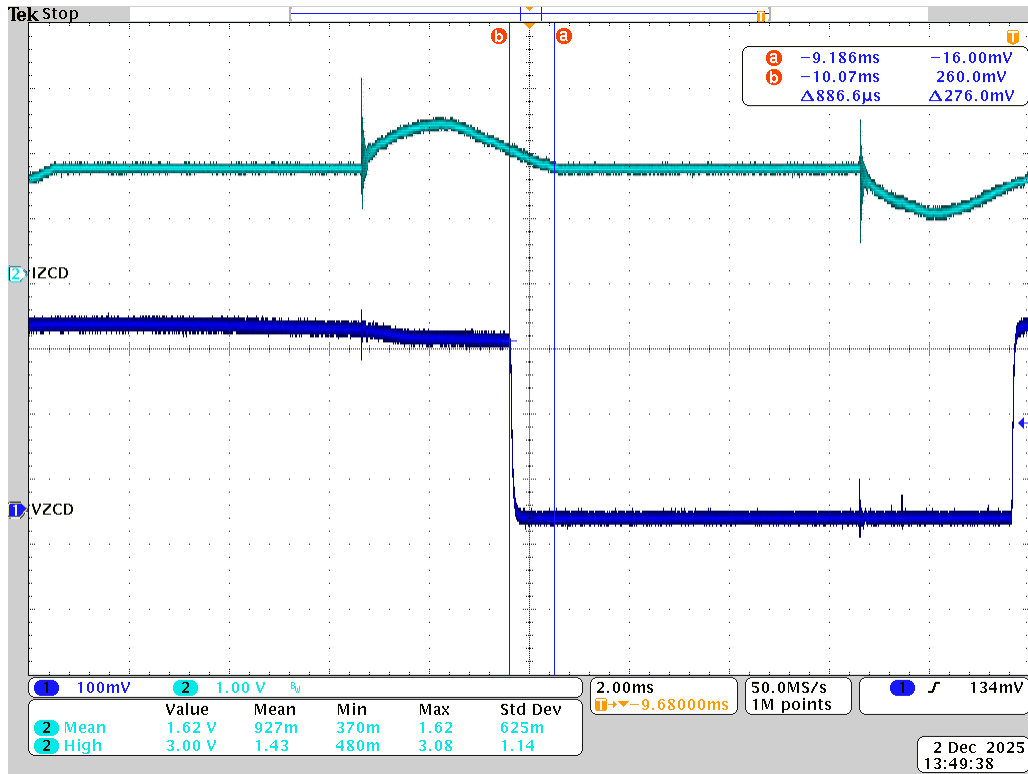


図 6-3. 低速モード時の信号 (青 - ZCD 信号、緑 - モーター電流)

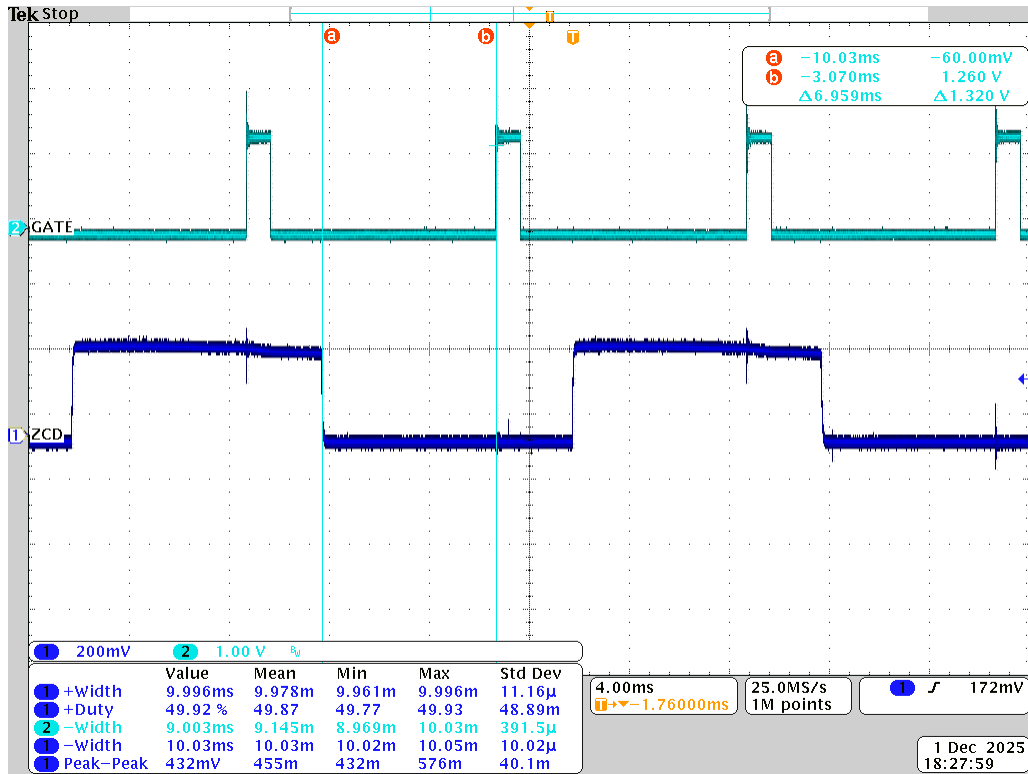


図 6-4. 中速モード時の信号 (青 - ZCD 信号、緑 - ゲートドライバ)

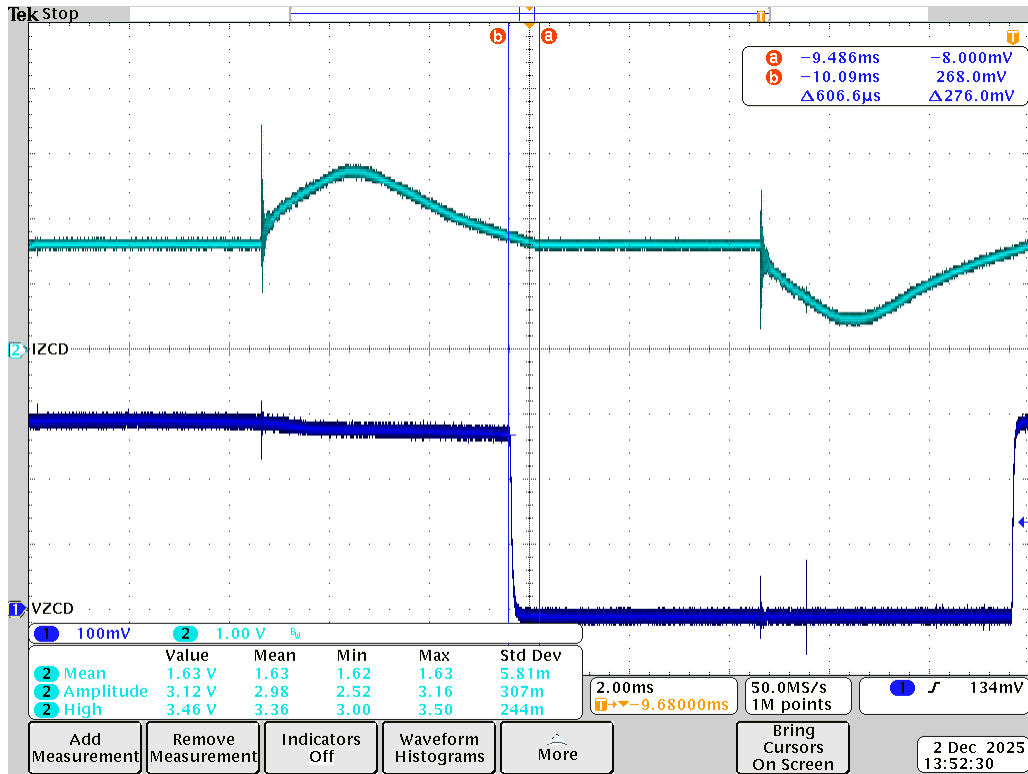


図 6-5. 中速モード時の信号 (青 - ZCD 信号、緑 - モーター電流)

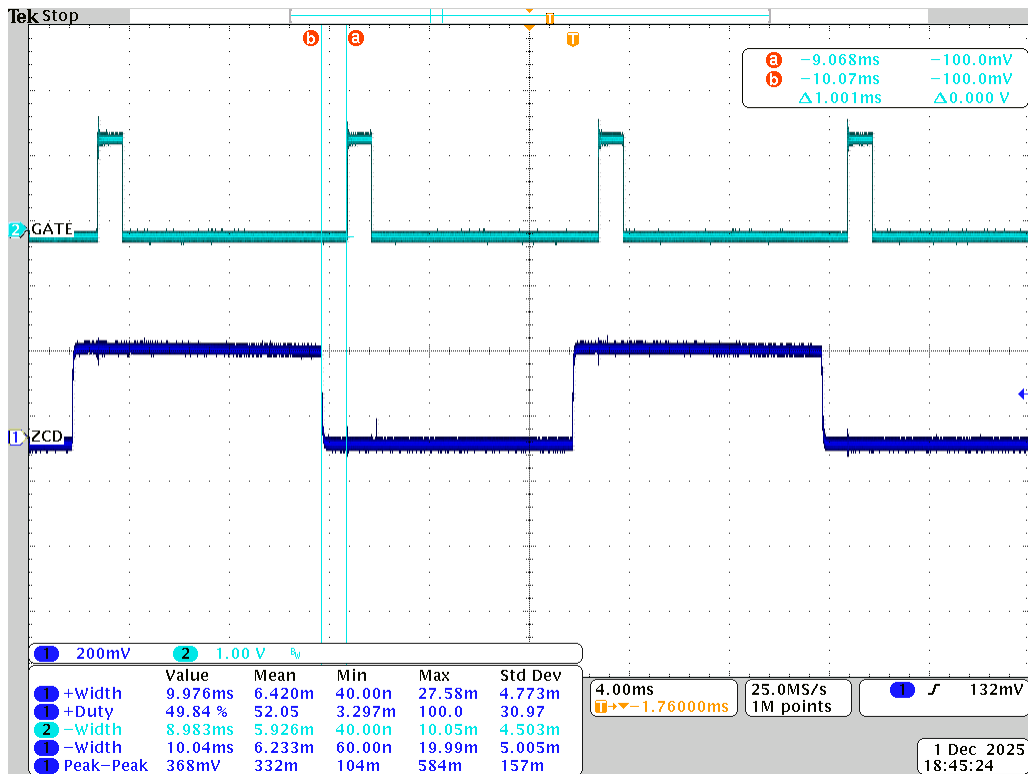


図 6-6. 中速モード時の信号 (青 - ZCD 信号、緑 - ゲートドライバ)

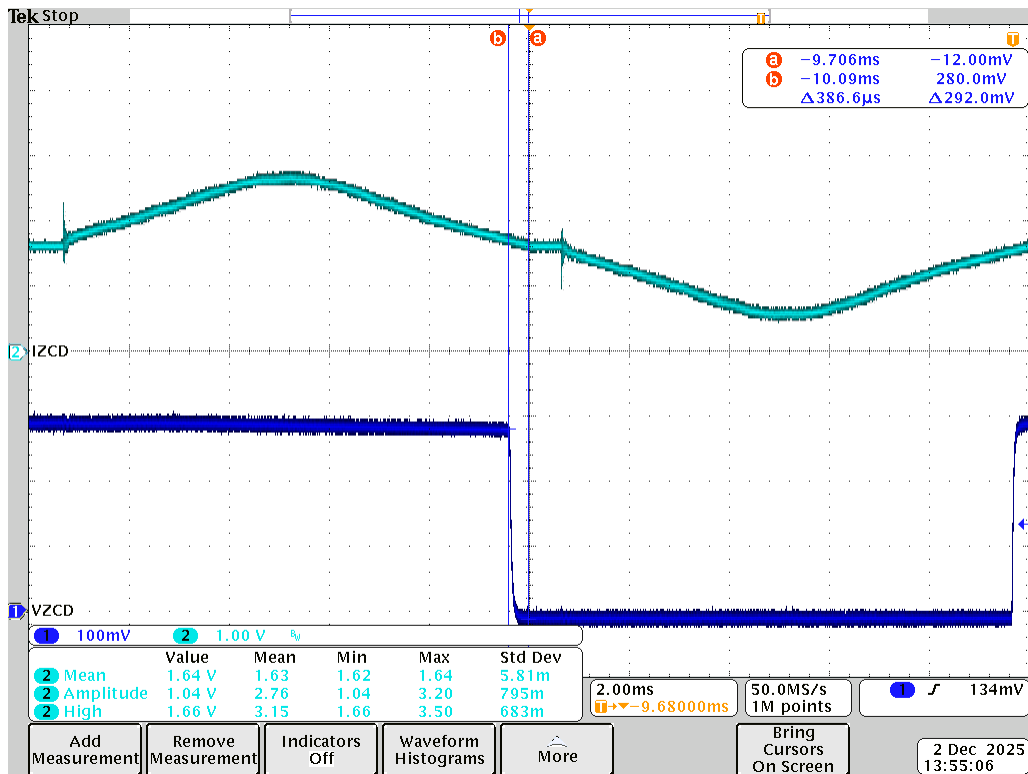


図 6-7. 中速モード時の信号 (青 - ZCD 信号、緑 - モーター電流)

### 6.3 ソフト スタート

点弧角は、目標速度間で急激に変化するのではなく、中間値を経て滑らかに変化します。この段階的な遷移は、UPDATE\_RATE および UPDATE\_STEP パラメータによって実現され、二つの AC サイクルごとに点弧遅延が 50 $\mu$ s ずつ段階的に調整されます。この滑らかなランプ制御により、モーターや駆動負荷への機械的ショックを防ぎ、クリック音や衝撃音などの可聴ノイズを低減するとともに、過電流保護のトリップや電圧フリッカの原因となる電流の過渡変動を最小限に抑えます。

図 6-8 に、速度をオフ モードから low モードに変更したときの出力電流の動作を示します。モーターが加速するにつれて、モーター電流は滑らかに増加します。

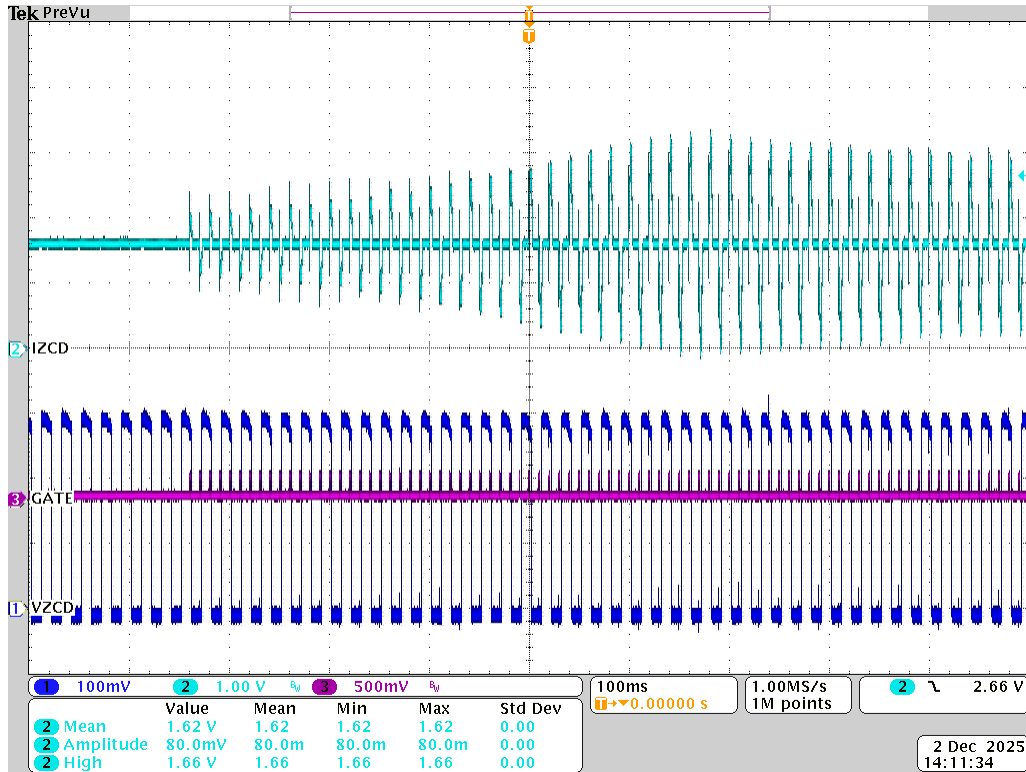


図 6-8. ソフト スタート

## 6.4 温度

図 6-9 に、重要な部品の熱測定結果を示します。高速モードで 10 分間動作した後、電流導通時の損失により、TRIAC の温度は最大で 125°C に達する可能性があります。一方で、MSPM0C1104 マイコンのパッケージ温度は、すべての動作条件において周囲温度から 10°C 以内に保たれます。

TI は、実際の製品において TRIAC に適切な放熱対策を施すことを推奨しています。



図 6-9. 温度テスト

## 7 まとめ

このアプリケーション ノートでは、家庭用機器向けに MSPM0C1104 マイコンを使用した、TRIAC ベースの AC モーター制御の完全な設計を紹介します。この設計は、高分解能タイマー、ADC、柔軟な GPIO などの MSPM0 の統合周辺機能を効果的に活用することで、最小限の外付け部品で精密な位相角制御、ソフトスタート機能、および過電流保護を実現できることを示しています。

## 8 参考資料

1. テキサス インストルメンツ、[MSPM0C110x](#)、[MSPS003 ミックスド シグナル マイコン](#)、データシート。

## 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