

Application Note

低成本 **MSPM0** を用いた単相 AC シャント電力モニタ

Chao Gao, Joe Wang, and Eason Zhou

概要

このアプリケーションノートでは、低成本のマイコンである MSPM0C1104 と外付け OPA の TLV9062 を用いた、単相 AC 電力エネルギー測定サブシステムを実装しています。(内部に 2 つの OPA を内蔵した MSPM0L1304 を使用することも可能ですが、このドキュメントでは検証していません)。電流検出にはシャントセンサを、電圧検出には抵抗分圧回路を使用しています。この設計は、4kHz のサンプリングレートにおいて、電流入力範囲 (340mA ~ 3.44A) に基づく精度試験で 2% 未満の精度を達成しており、計測パラメータの計算には TI 製の低成本 Arm® Cortex®-M0+ マイコンを使用しています。

この設計でサポートされている主な特長:

- 低成本のソリューション
- 電力モニタ向け単相 2 線式 (1P2W)、シャント方式の計測サブシステム (精度 <2%)
- 実効値 (RMS) の電流と電圧、有効電力、無効電力、皮相電力、および力率の計算
- Microsoft® Windows® PC の GUI に結果を表示する、リファレンステストシステムに対するパルス出力を備えたエネルギー測定ソフトウェア

ソフトウェアと評価ボード向けの設計リソースは、こちらから [\[Downloadlink\]](#) ダウンロードできます

目次

概要	1
1 システムの概要	2
2 ハードウェアの実装	3
2.1 電源	3
2.2 電圧検出	3
2.3 電流入力	3
3 ソフトウェアの紹介	5
3.1 ペリフェラルの設定	5
3.2 計測計算エンジン	5
3.3 フォアグラウンド プロセス	6
3.4 バックグラウンド プロセス	6
3.5 PC GUI の概要	7
4 デモ ボードのクイック スタートとキャリブレーション	9
4.1 評価ボードの概要	9
4.2 スケーリング係数のキャリブレーション	10
5 テスト結果	11
6 参考資料	12

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

このドキュメントでは、低コストでシンプルなテキサス インストゥルメンツ製マイコンの「MSPM0C1104」を用いた、単相 AC 電力モニタのアプリケーションについて説明します。MSPM0C1104 は、電圧および電流センシング用の 12 ビット SAR ADC と、PC 上で動作する GUI と通信するための UART 通信インターフェースを統合した、ミックス信号マイコンです。TLV9062 は、電流および電圧の差動信号検出に使用される、低コストの 2 チャネル OPA です。(内部に 2 つの OPA を内蔵した MSPM0L1304 を使用することも可能です)

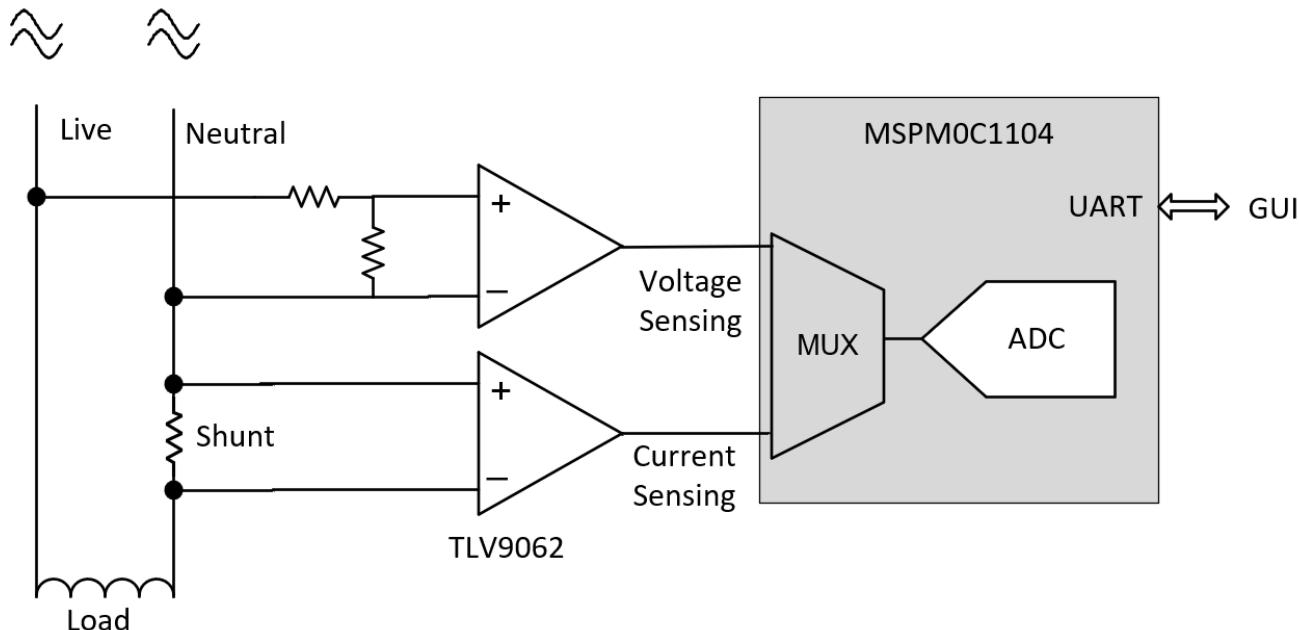


図 1-1. MSPM0C1104 を使用した電力モニタの図

2 ハードウェアの実装

2.1 電源

このデモでは、MSPM0C1104 と TLV9062 の両方に、入力電圧 3.3V ~ 18V、出力電圧 3.3V の LDO TLV76133 から電源を供給しています。

2.2 電圧検出

商用電源の電圧は通常 230V であり、ADC の基準電圧である 3.3V の範囲まで降圧する必要があります。電圧用のアナログフロントエンドは、シンプルな分圧回路と、単電源 ADC で検出できるよう電圧信号にバイアスを加えるための OPA で構成されています。入力電圧信号を安全な範囲に制限するため、R8 と並列に保護ダイオードを追加することが推奨されます（このデモでは実装されていません）。

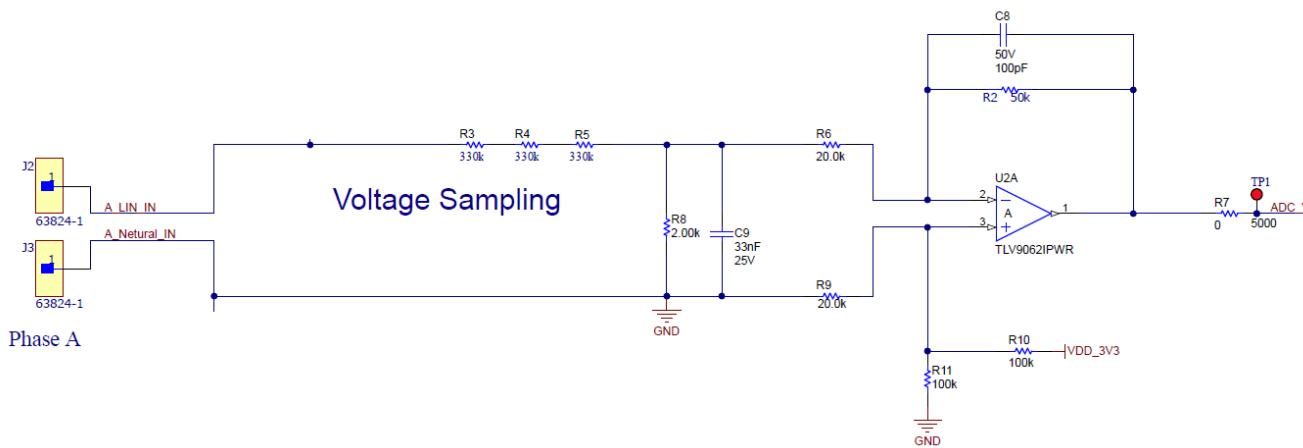


図 2-1. 電圧入力用のアナログ フロント エンド

バイアス電圧は ADC 基準電圧の 1/2 とすることが推奨されます。このデモでは、ADC のリファレンス電圧として VDD を使用しています。そのため、バイアス電圧が約 1.65V となるよう、R10 および R11 の値を適切に選定します。

2.3 電流入力

電流センサのインターフェイス回路では、R12 をシャント センサとして使用し、OPA によって差動信号を単端信号へ変換します。入力電圧信号を安全な範囲に制限するため、R12 と並列に保護ダイオードを追加することが推奨されます（このデモでは実装されていません）。バイアス回路は、電圧検出回路と同一です。

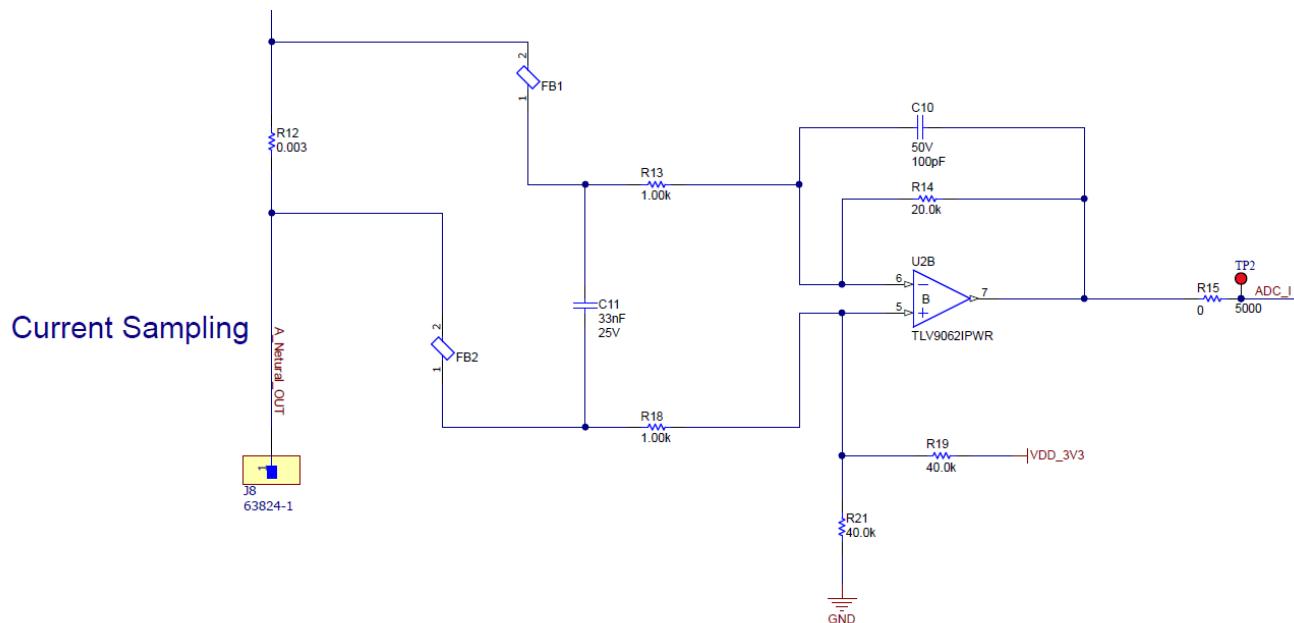


図 2-2. 電流入力のアナログ フロント エンド

3 ソフトウェアの紹介

3.1 ペリフェラルの設定

このアプリケーションで使用する主な周辺機能は、12ビットADC、内部REF（オプション）、タイマ、およびUARTです。

ADCはシーケンス変換モードとして設定されており、サンプル&ホールド時間は1usです。このデモでは、ADCのリファレンス電圧としてVDDを使用しています。タイマを使用して、サンプルレート4KspsでADCをトリガします。UARTはGUIとの通信に使用され、通信条件はボーレート115200、パリティなし、ストップビット1です。

3.2 計測計算エンジン

計測演算エンジンは、電圧および電流のADCチャネルから取得した情報に基づいて、実際のサンプリングおよび演算を実行します。このエンジンは、時間制約の厳しいバックグラウンド処理と、比較的時間制約の緩いフォアグラウンド処理として動作します。

バックグラウンド処理は、サンプルレートでADCによってトリガされます。この処理はADCの割り込みサービスルーチン内で実行され、自動的に処理されます。

フォアグラウンド処理は、レポートおよび更新レートにおいて、バックグラウンド処理の完了をトリガとして起動されます。バックグラウンド処理により、`HAL_ADC_PHASE_A_DATA_READY` フラグが設定されます

フォアグラウンド処理でデータを処理できる状態であることを示すため変数 `phaseDataReady` 内に設定されます。その後、アプリケーションはこのフラグを監視し、`EM_processForegroundData()` を呼び出すことでフォアグラウンド処理をトリガーする必要があります。実際の演算では、計測演算において以下の式を使用します

$$V_{\text{RMS}} = \text{VGAIN} \times \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N V_{\text{samp}(i)} \times V_{\text{samp}(i)}} \quad (1)$$

$$I_{\text{RMS}} = \text{IGAIN} \times \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N I_{\text{samp}(i)} \times I_{\text{samp}(i)}} \quad (2)$$

$$P_{\text{active}} = \text{PGAIN} \times \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N V_{\text{samp}(i)} \times I_{\text{samp}(i)} \quad (3)$$

$$P_{\text{reactive}} = \text{PGAIN} \times \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N V_{\text{samp},90(i)} \times I_{\text{samp}(i)} \quad (4)$$

$$P_{\text{apparent}} = V_{\text{RMS}} \times I_{\text{RMS}} \quad (5)$$

$$\text{PF} = \cos\varphi = \frac{P_{\text{active}}}{P_{\text{apparent}}} \quad (6)$$

3.3 フォアグラウンド プロセス

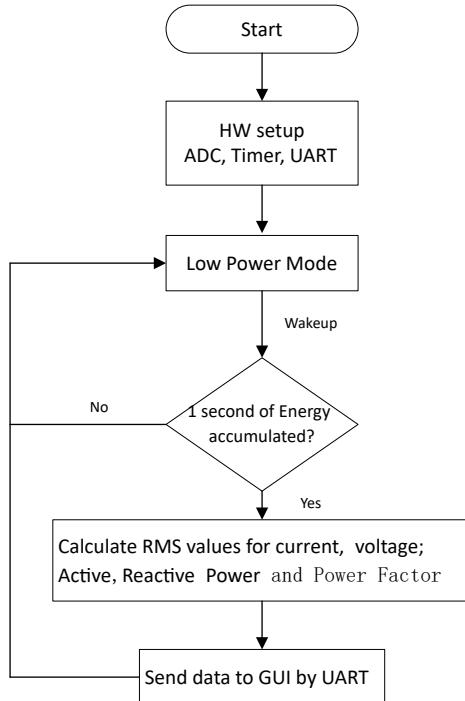


図 3-1. フォアグラウンド処理図

初期化ルーチンでは、ADC、タイマ、汎用入出力 (GPIO) ポートピン、および UART の設定を行います。デバイスは、while (1) ループ内で低消費電力モードに移行します。通常動作中は、256us/4KHz ごとに発生する ADC 割り込みによってバックグラウンド処理が実行され、CPU がウェークアップされます。その後、フォアグラウンド処理が 1 秒分のエネルギー積算フラグをチェックします。これは、入力される電圧信号および電流信号に同期したデータサンプルを、50 または 60 サイクル分積算することに相当します。さらに、サンプルカウンタは、フレーム期間中に積算されたサンプル数を追跡します。この数は、ソフトウェアが受信する商用電源周波数と同期することで変化する可能性があります。データサンプルセットは、処理済みの電流、電圧、有効エネルギー、および無効エネルギーで構成されます。すべての値は ADC 割り込み内で個別の変数に積算され、フォアグラウンド処理においてさらに処理され、RMS 値および平均値が算出されます。

3.4 バックグラウンド プロセス

バックグラウンドプロセスは、4KHz での ADC 割り込みです。割り込み処理内では、電圧および電流の ADC 変換結果を読み取り、残留 DC 成分を除去した後、Irms、Vrms、有効電力、無効電力を算出するためにサンプルを積算します。また、周波数を算出し、1 秒分のエネルギー積算が完了しているかどうかを確認します。

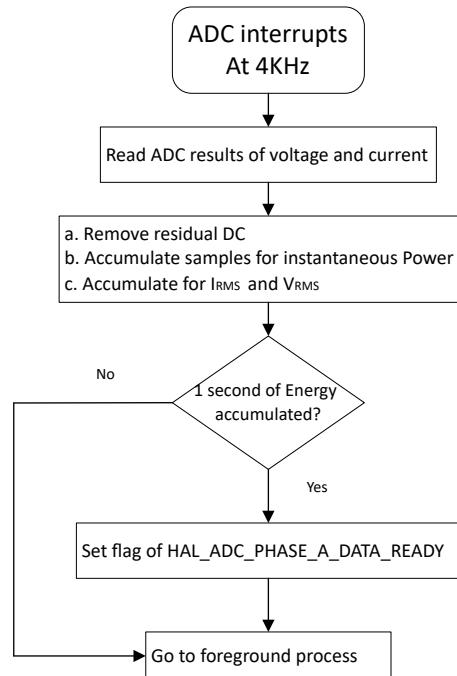


図 3-2. バックグラウンド処理の図

3.5 PC GUI の概要

Python の QT5 で作成された GUI があり、試験結果を容易に表示できます。また、この GUI は、必要に応じて結果を Excel ファイルに自動的に保存することもできます。

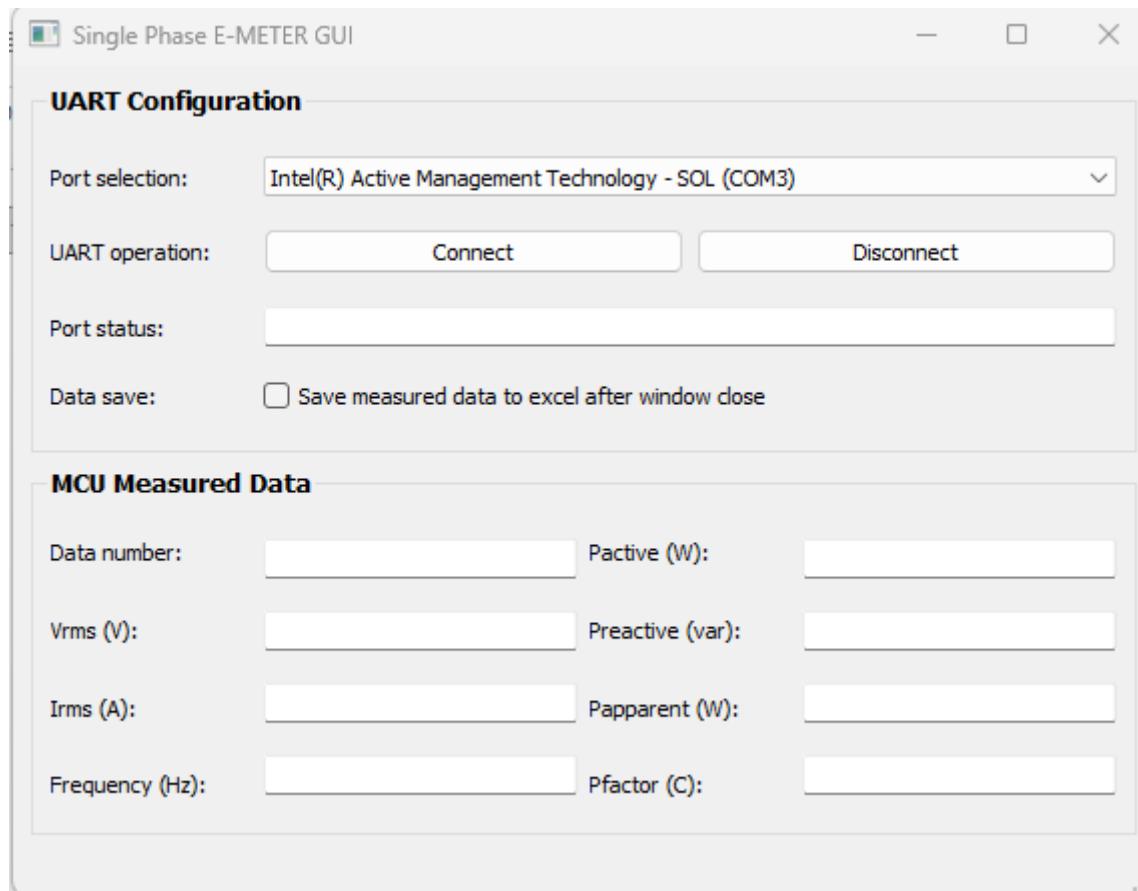


図 3-3. PC GUI

GUI を使用するには、MSPM0C1104 を USB から UART への接続ツールに接続する必要があります。このデモでは、launchpad で XDS110 UART バックチャネルを使用します。GUI を開き、USB-UART ツールで使用されている正しい COM ポートを選択して、「接続」をクリックします。「接続」をクリックすると、GUI は 1 バイトの「0 x 22」を送信し、MSPM0C に対して 1 秒ごとにメータの測定結果データを送信開始するよう通知します。以下のデータ形式

ヘッダ (0 x 80) + データ (38 バイト)

表 3-1. データセクションの詳細

項目	長さ (LSB バイト先行)	形式
VRMS	4 バイト	IQ14
IRMS	4 バイト	IQ14
周波数	2 バイト	実際の周波数 * 100
アクティブ時の消費電力	8 バイト	IQ8
無効電力	8 バイト	IQ8
見かけの電力	8 バイト	IQ8
力率	4 バイト	実際の PF * 10000

IQ14 または IQ8 の形式では、実際のデータは 2^{14} または 2^8 で除算することで算出されます。

4 デモ ボードのクイック スタートとキャリブレーション

4.1 評価ボードの概要

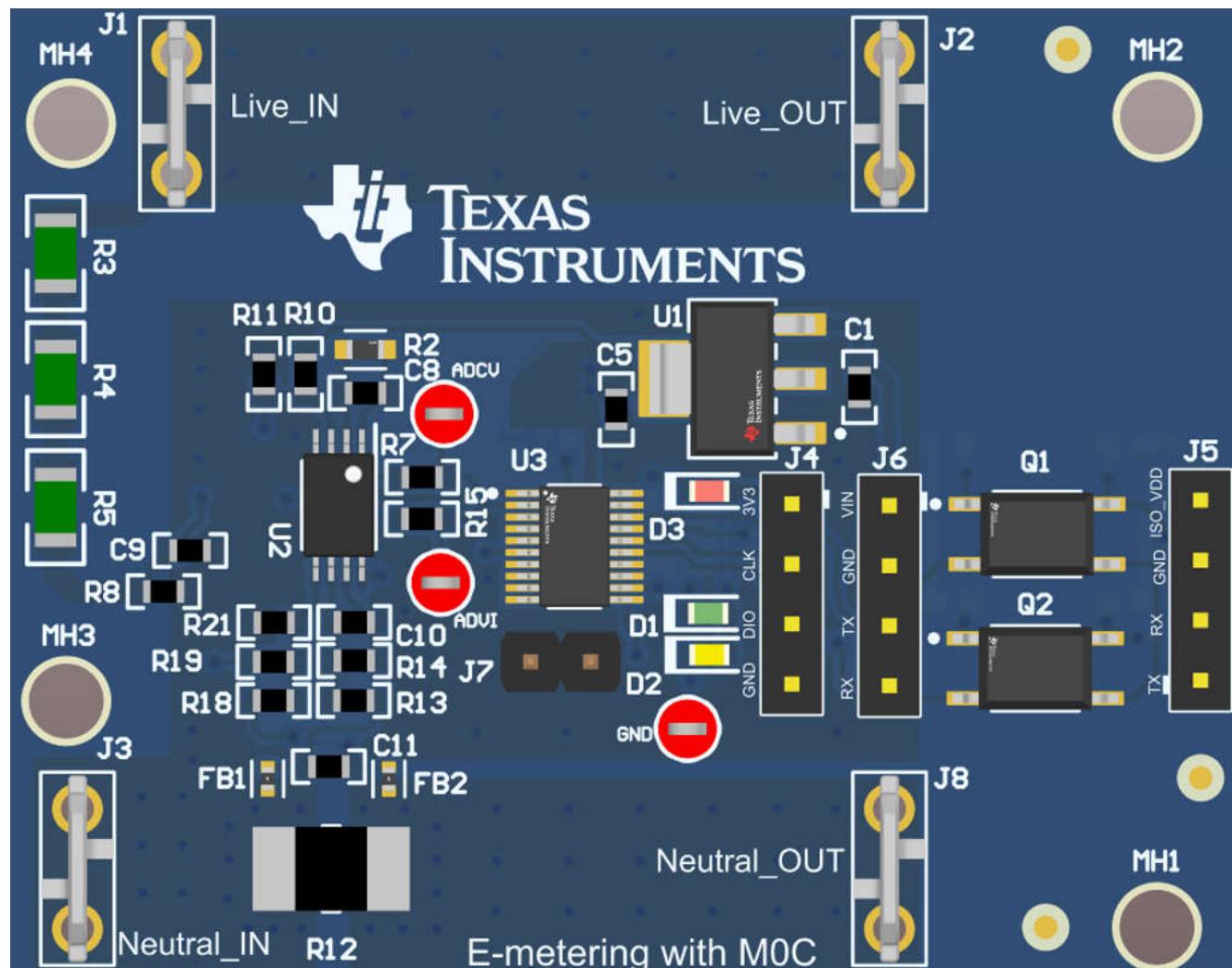


図 4-1. 評価ボード

表 4-1. 評価ボードのコネクタ

ヘッダー名	主な機能	コメント
J1	ライブのライン入力	
J2	ライブのライン出力	
J3	ニュートラル ライン入力	
J8	ニュートラル ライン出力	
J4	SWD プログラム ポート	3.3V を直接供給できます
J6	DC 電源と通信ポート	DC 電源および UART ポートで、DC 電圧は 3.3V ~ 18V の範囲で供給可能
J5	絶縁型通信ポート	ここでは、絶縁 VDD が必要です

4.2 スケーリング係数のキャリブレーション

このソリューションを異なる AFE で使用できるようにするために、システム内のゲイン誤差を補正するスケーリング係数を定義します。MSPM0C1104 のソース コードでは、`Vrms`、`Irms`、有効電力、および無効電力用に 4 つのスケール係数が用意されています。スケール係数は、`user_config.h` ファイルに定義されています。

5 テスト結果

このソリューションでは、以下のハードウェアに基づいてテストしています

- AC 電源: Chroma プログラマブル AC ソース 61503 (精度 0.2%)
- 抵抗負荷: LINGO ドライタイプ負荷装置
- 温度テストチャンバ: Votsch VT4002
- EVM ボード上の抵抗器の精度は 1% ベースです

表 5-1. さまざまな電流負荷精度テスト - 電流と電圧

電流リファレンス (A)	電流測定 (A)	電流誤差 (A)	電流誤差 %	電圧リファレンス (V)	電圧測定 (V)	電圧誤差 (V)	電圧誤差 %
0.34	0.344	0.004	1.18 (最大)	220.1	220.42	0.32	0.15
0.69	0.698	0.008	1.16	220.1	220.29	0.19	0.09
1.04	1.0412	0.0012	0.12	220.2	220.26	0.06	0.03
1.39	1.387	-0.003	-0.22	220.1	220.04	-0.06	-0.03
1.72	1.726	0.006	0.35	220.1	219.91	-0.19	-0.09
2.07	2.073	0.003	0.14	220	219.83	-0.17	-0.08
2.42	2.422	0.002	0.08	220	219.67	-0.33	-0.15
2.76	2.759	-0.001	-0.04	220	219.56	-0.44	-0.2
3.1	3.106	0.006	0.19	220	219.53	-0.47	-0.21
3.44	3.444	0.004	0.12	220	219.39	-0.61	-0.28 (最大)

表 5-2. 異なる電流負荷における精度試験 - 有効電力

電力リファレンス (W)	電力測定 (W)	電源誤差 (W)	電源誤差 %
76.2	75.64	-0.56	-0.73 (最大)
153	153.46	0.46	0.3
229	228.96	-0.04	-0.02
305.2	304.57	-0.63	-0.21
379.5	379.06	-0.44	-0.12
455.9	455.07	-0.83	-0.18
532.7	531.07	-1.63	-0.31
607	604.75	-2.25	-0.37
683.2	680.68	-2.52	-0.37
757.5	754.33	-3.17	-0.42

表 5-3. 代表的な精度と温度との関係

温度 (°C)	電圧 (V)			電流 (A)			アクティブ電力 (W)		
	Vmeasure	Vref	エラー(%)	Imeasure	Iref	エラー(%)	Pmeasure	Pref	エラー(%)
0	219.21	220	-0.36	2.066	2.07	-0.19	452.17	456	-0.84
10	219.55	220	-0.2	2.071	2.07	0.05	453.97	456.6	-0.58
20	219.79	220	-0.1	2.075	2.07	0.24	455.3	456.5	-0.26
25	219.89	220	-0.05	2.076	2.07	0.29	455.79	456.5	-0.16
35	220.18	220	0.08	2.08	2.07	0.48	457.34	456.5	0.18
45	220.45	220	0.2	2.084	2.07	0.68	458.69	456.5	0.48
55	220.72	220	0.33	2.087	2.07	0.82	460.04	456.6	0.75
65	220.96	220	0.44	2.091	2.07	1.01	461.41	456.6	1.05
75	221.21	220	0.55	2.095	2.07	1.21	462.7	456.6	1.34
85	221.44	220	0.65 (最大)	2.098	2.07	1.35 (最大)	463.91	456.6	1.6 (最大)

6 参考資料

- テキサス・インスツルメンツ: [MSPM0C1104 データシート](#)
- テキサス・インスツルメンツ: [配線抵抗および EMI コンデンサ補償機能を備えた単相 AC/DC 電力モニタ](#)

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默示保証、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、明示的または默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、(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、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 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