

Design Guide: TIDA-010037

スタンドアロン ADC を使用した高精度の分相 CT 電気メータのリファレンス デザイン

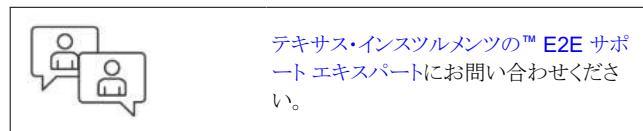


説明

このリファレンス デザインは、高性能のマルチ チャネル アナログ/デジタル コンバータ (ADC) を使用して、Class 0.1 の相分割エネルギー測定機能を実装します。ADC は、AC 電源の各相の電流と電圧を測定するために、8kHz で電流トランス (CT) をサンプリングします。このリファレンス デザインは、広い入力電流範囲 (0.05~100A) にわたって高い精度を維持し、個別の高調波分析のような電力品質機能で必要な、高いサンプリング周波数に対応しています。一部のソフトウェア機能を無効にすることで、32ksps の ADC サンプル レートを実現できます。独立した ADC により、統合型 SoC に比べて計測用マイコンの選択肢が柔軟になります。このリファレンス デザインは、計測に SimpleLink™ ARM® Cortex-®M4 ホストマイコンを使用しています。必要なソフトウェア機能は、ADC エネルギー計測ライブラリに実装されています。ソフトウェア ライブラリは、Code Composer Studio™ または IAR Embedded Workbench® を使用してコンパイルできます。

リソース

TIDA-010037	デザイン フォルダ
ADS131M04、MSP432P4111	プロダクト フォルダ
TPS3840、TPS25921I、THVD1500	プロダクト フォルダ
ISO7731B、TRS3232E	プロダクト フォルダ
ADC エネルギー測定ライブラリ	ソフトウェア

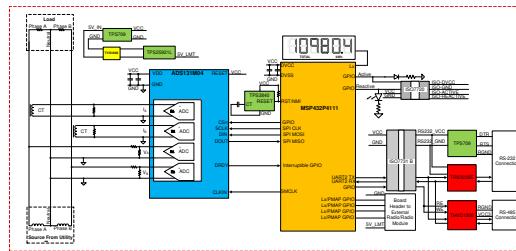


特長

- 10000:1 の入力範囲にわたって ANSI C12.20 Class 0.1 の有効エネルギー精度要件を満たす、電気メータ向けの分相計測
- 有効および無効のエネルギーと電力、RMS (実効値) 電流および電圧、力率、ライン周波数の計算
- 5kV_{RMS} の絶縁を達成した、絶縁型の RS-232 と RS-485
- 電流制限、過電圧、低電圧の各保護機能を搭載した通信モジュール拡張機能
- 50mA ~ 100A の入力範囲全体でテスト済み
- ADC のサンプリング レートを 32ksps に上昇させた場合も、アクティブ エネルギーの高精度を引き続き達成
- エネルギーを計測して Windows ®PC の GUI で結果を表示するためのソフトウェア。

アプリケーション

- 電気メータ
- 電力品質メータ
- 電力品質分析器



1 システムの説明

1.1 最終製品

1.1.1 電気メーター

電力会社が電気メータに求める機能の高度化に伴い、電気メータにはこれまで以上に多くの機能が求められるようになっています。メータには、調波解析のような高度な機能がこれまでより求められるようになっています。こうした要件を満たすために、処理能力や精度の要件も進化させる必要がある場合がよくあります。たとえば、電気メータに高調波分析機能を追加するには、目的の周波数範囲をキャプチャするために、メータのサンプルレートを高くする必要があります。サンプリング周波数の向上は、多くの場合、精度を損なうことなく、むしろ同時に精度を高めながら行う必要があります。したがって、高いサンプルレートを使用すると、より多くの処理能力が必要になります。

電気メータに求められる精度と処理量が増すにつれて、電気メータの処理要件と精度要件の両方を満たす計測用 SoC を見つけることが、いっそう難しくなっています。この制約に対処するために、ホストマイコン (MCU) と組み合わせてスタンダードアロン ADC を使用することで、電力量計用 SoC の処理能力と精度の両方の制限を同時に克服することができます。高精度なスタンダードアロン ADC を使用することには、一般的に次のような利点があります：

- 最も厳しい精度要件を満たすことが可能
- アプリケーション専用製品や計測用 SoC では達成できない場合のある、精度を損なわずに最低サンプルレート要件を満たすことが可能
- 高精度な ADC を内蔵したマイコンを選ぶ必要がなくなるため、ホストマイコンの選択に柔軟性が生まれます。ホストマイコンは、処理能力、電力量の記録に必要な最小限の RAM およびフラッシュストレージ、メーターデータの安全性を確保するためのセキュリティ機能など、アプリケーションの要件のみに基づいて選定できます。

エネルギー消費量を正しく検出するため、電圧および電流センサは、商用電源の電圧と電流を、ADC が検出できる電圧範囲に変換します。分相配電システムを使用する場合、2つの異なるラインから流れる電流を適切に検出し、ADC を損傷から保護するために、電流センサを絶縁する必要があります。この理由から、分割相、2相、3相の電気メータの電流センサには、本質的に絶縁されている電流トランスが従来から使用されてきました。

このリファレンス デザインでは、スタンダードアロン ADC デバイスを使用して、クラス 0.1 精度の分相式 CT ベース エネルギー測定が実装されています。スタンダードアロン ADC は、商用電源の電圧と電流を検出します。新しい ADC サンプルが利用可能になると、ホスト MCU は SPI 経由でスタンダードアロン ADC と通信し、新しいサンプルを取得します。ホストマイコンは、スタンダードアロン ADC からの新しい ADC サンプルを使用して計測パラメータを計算します。計測パラメータを算出するだけでなく、ホスト MCU はボード上の液晶ディスプレイ (LCD) を駆動し、ボードに搭載された絶縁型 RS-232 回路または絶縁型 RS-485 回路を介して PC の GUI と通信も行います。追加の保護機能として、ホスト MCU に電力を供給するための供給電圧が不十分な場合にホストマイコンをリセットするため、外部 SVS デバイスが設計に追加されます。一般的に、外部 SVS を使用する方が、ホストマイコンに内蔵された SVS よりも高い安全性を提供します。

この設計では、テストソフトウェアが分相式エネルギー測定における各種計測パラメータの演算を重点的にサポートしています。これらのパラメータは、キャリブレーション用 GUI または LCD のどちらからでも確認できます。エネルギー測定時に計算される主なパラメータは次のとおりです。

- 有効、無効、皮相電力およびエネルギー
- RMS 電流と電圧
- 力率
- ライン周波数

ADC のサンプルレートを 32 kspS に設定して有効電力量の誤差率をテストする際、テストソフトウェアは 1 相動作用に一部のパラメータのみをサポートする簡易版に構成されています。

また、この設計では、通信用に外部無線モジュールまたは無線モジュールを追加することもできます。この設計では、外部無線モジュール用の電源レールに電流制限が設けられており、通信モジュールで短絡が発生しても計測機能に影響を与えないようになっています。

1.1.2 電力品質メータ、電力品質アナライザ

このスタンドアロン ADC アーキテクチャは、電力計に使用されるだけでなく、電力品質アナライザや電力品質メーターにも使用できます。電力品質メーターおよび電力品質アナライザは、電圧高調波、電流高調波、供給電圧のディップ、供給電圧のスウェルなど、特定の電力品質パラメータを測定することで、電力会社や産業企業が電力品質を監視および制御するのに役立ちます。これらの最終機器では、電力品質パラメータを計算するために多くの計算が必要です。また、さまざまな電力品質パラメータの精度要件を満たすため、精度は重要です。高精度と計算能力の要件は、この設計で行われているように、スタンドアロン ADC と、別のホスト MCU またはプロセッサを使用することで、十分にサポートされます。

電力品質メータと電力品質アナライザで一般に測定されるパラメータとして、電圧と電流の高調波があります。最も正確な高調波計算を行うためには、同時サンプリングを実装する必要があります。コヒーレント サンプリングを実装する 1 つの方法は、商用電源の周波数に基づいてサンプリング クロックを変化させることです。このデザインのスタンドアロン ADC には、コヒーレント サンプリングをサポートするために、変動クロックを受け付ける機能があります。この設計では、スタンドアロン ADC のクロックは変更可能ですが、サンプリング クロックの解像度が適切に変更できないため、同時サンプリングはサポートできないことに注意が必要です。ただし、スタンドアロン ADC のクロックは変更可能であるため、この機能は将来的に設計に追加することができます。

1.2 主なシステム仕様

表 1-1. 主なシステム仕様

特長	説明
相数	1 (2 つの電圧を測定した分相)、1 (1 つの電圧を測定した場合の分相)、2 相
電気メーターの精度クラス	クラス 0.1
電流センサ	変流器
テストした電流範囲	0.05~100A
テストした電圧範囲	15 V~240V
ADS131M04 の CLKIN 周波数	8,192,000Hz
ADS131M04 のデルタ シグマ変調クロック周波数	4,096,000Hz (= CLKIN / 2)
SPI クロック	8,192,000Hz
オーバーサンプリング レート (OSR)	512
デジタル フィルタ出力のサンプル レート	8,000 サンプル /秒
位相補償の実装	ソフトウェア
位相補償分解能	50Hz で 0.0088°、60Hz で 0.0105°
選択した CPU クロック周波数	48MHz
MCU の外部 SVS 電圧	2.0~2.1V
システムの公称周波数	50 または 60Hz
測定されたパラメータ	<ul style="list-style-type: none"> • 有効、無効、皮相電力およびエネルギー • RMS (実効値) 電流および電圧 • 力率 • ライン周波数
測定パラメータの更新レート	約 1 秒に相当
通信オプション	<ul style="list-style-type: none"> • LCD • 5kVRMS の絶縁型 RS-232 または絶縁型 RS-485 を介して PC の GUI と通信 • 外部無線機、または通信ヘッダに接続された無線機モジュール <ul style="list-style-type: none"> – 5V レール、過電流熱シャットダウン イベント後に手動リセットで 1.6A に制限 – 5V レールの電源故障検出スレッショルド (VIN 立ち下がり) = 4.05V – 5V レールの UVLO 解除スレッショルド (VIN 立ち上がり) = 4.28V – 5V レールの過電圧状態解除スレッショルド (VIN 立ち下がり) = 5.62V – 5V レール = 5.81V で測定された過電圧カットオフ スレッショルド (VIN 立ち上がり) <ul style="list-style-type: none"> – (通信用にカスタム ソフトウェアを作成する必要があります)
利用している LED	合計有効エネルギーと合計無効エネルギー
基板の電源	オプション 1:3.3V を直接 DVCC レールに接続、オプション 2:5V から J4 ヘッダ

2 システム概要

2.1 ブロック図

図 2-1 と 図 2-2 は、ADS131M04 を使用した分割位相電力測定アプリケーションで使われる高レベルインターフェースを示すブロック図を表しています。2 電圧構成では、各ライン線についてラインから中性線への電圧が直接測定されます。これに対し、単一電圧の構成では、ラインと中性線の間電圧ではなく、ライン間電圧のみが直接測定されます。

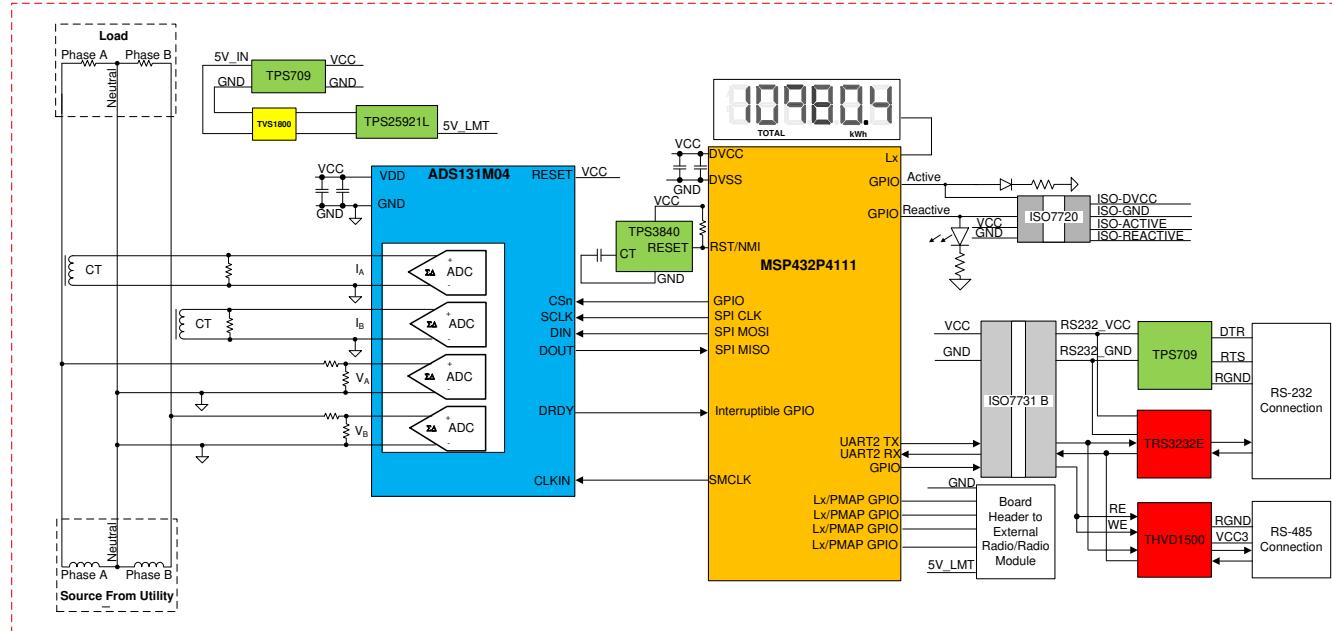


図 2-1. TIDA-010037 のブロック図、2 電圧構成

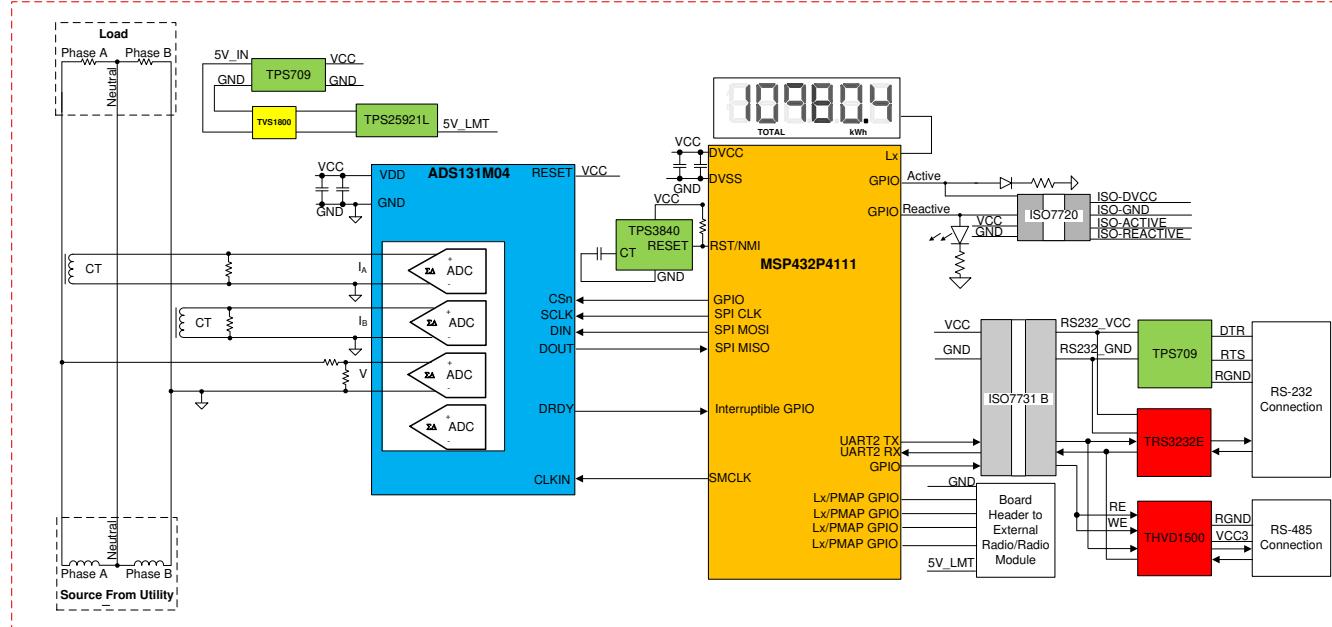


図 2-2. TIDA-010037 のブロック図、単一電圧構成

図では、電流センサが電流チャネルに接続され、対応する電圧には単純な分圧回路が使用されています。CT には関連する負荷抵抗があり、測定デバイスを保護するため常に接続しておく必要があります。CT と負荷抵抗は、メーカーと、エネルギー測定に必要な電流範囲に基づいて選択されます。

電圧チャンネル用の分圧抵抗は、商用電源電圧を分圧して、ADS131M04 デバイスの通常の入力範囲内に収まるように選定されています。ADS131M04 ADC はダイナミックレンジが広く、電圧の測定にそれほど広いダイナミックレンジは必要ないため、電圧チャネル ADC の入力で見られる最大電圧がフルスケール電圧のごく一部になるよう、電圧フロントエンド回路が意図的に選択されています。ADS131M04 の電圧 ADC に入力される電圧を低くすることで、電圧 ADC の精度を多少犠牲にしながらも、計測精度により大きな影響を与える電圧と電流間のクロストークを低減できます。これにより、低電流時のエネルギー測定精度が向上します。

この設計では、ADS131M04 デバイスは MSP432™ MCU と次のように連携します：

1. ADS131M04 デバイスで使用される CLKIN クロックは、MSP432 MCU の SMCLK クロック信号出力から供給されています。
2. ADS131M04 デバイスは、CLKIN ピンに供給されるクロックを 2 分周し、この分周されたクロックをデルタシグマ変調クロックとして使用します。
3. 新しい ADC サンプルの準備ができた時点で、ADS131M04 デバイスは RDY ピンをアサートし、新しいサンプルが使用可能であることを MSP432 MCU に通知します。
4. 新しいサンプルが通知されると、MSP432 MCU は SPI インターフェイスの一つと DMA を使用して、ADS131M04 デバイスから電圧および電流サンプルを取得します。

この設計では、TPS3840 デバイスが MSP432 MCU の外部 SVS として使用されています。MSP432 MCU にはこのアプリケーションに十分な内部 SVS が備わっていますが、MCU とは独立した SVS を使用することで追加の安全性が得られるため、スタンドアロン型の TPS3840 SVS が採用されています。

図 2-1 および 図 2-2において注目すべき他の信号として、精度測定および校正に使用される有効電力パルスと無効電力パルスがあります。ISO7720 デバイスには絶縁型接続があり、これらのパルスを非絶縁型機器に接続できます。これは特に単一電圧構成で必要となります。この構成では、システムが 2 本の高電圧ラインのうち一方を基準として動作するためです。

絶縁されたパルスに加えて、この設計では TPS70933、ISO7731B、および TRS3232E デバイスを使用することで、絶縁された RS-232 通信にも対応しています。この設計は、基板上の ISO7731B および THVD1500 デバイスを使用することで、RS-232 の代わりに RS-485 を使用する構成できます。

この設計は、ボード上の J11 および J12 ヘッダに接続された外部無線機または無線モジュールを使用した通信にも対応しています。J11 ヘッダは P7.0、P7.1、P7.2、P7.3 ポートピンに接続されており、LCD を無効にした場合、これらのピンをポートマップ可能な GPIO ピンとして設定できます。ソフトウェアを追加することで、これら 4 つのピンのいずれかを通信ピン (SPI または UART) として構成し、適切にパケットの読み書きを行うことで、MSP432 MCU が外部無線機または無線モジュールと通信できるようになります。J12 ヘッダは、無線機への電源レールおよび GND の接続用です。J12 上の電源レールは、J4 の 5V_IN レールに電流制限を加えたバージョンです。J12 の電源レールは、TPS25921L デバイスによって 1.6A に電流制限されています。無線モジュールで短絡が発生した場合や、何らかの理由で電流が 1.6A を超えた場合、この電源レールへの電力は制限され、電源がこのボードの計測関連部分に影響を与えないよう保護されます。過渡的な過電流イベントの場合、モジュールは電力を受け取り続け、中断することなく動作します。しかし、モジュールに持続的な故障が発生した場合、TPS25921L デバイスはサーマルシャットダウン状態に入り、電源が遮断されます。このサーマルシャットダウン発生後、電源を無線モジュールに再接続するには、P5.2 GPIO ピンを駆動して手動で行う必要があります。さらに、J4 の 5V_IN レールに入力される電圧が約 4.0 V 未満または 5.8 V を超えた場合、TPS25921L デバイスは J12 の電源レールを切断するように設定されています。スイッチングによる過渡現象から TPS25921L デバイスを保護するために、TVS1800 サージ保護デバイスがこのデバイスに接続されています。

この設計は、DVCC ヘッダ (J9) に直接 3.3V を印加するか、または 5V_IN ヘッダ (J4) に 5V を入力して TPS70933 デバイスを介して給電することで動作させることができます。両方の給電方法における適切なジャンパ接続の詳細については、表 3-1 を参照してください。

2.2 主な使用製品

2.2.1 ADS131M04

ADS131M04 デバイスは、4 チャネル同時サンプリング、24 ビット、2 次デルタシグマ ($\Delta\Sigma$) A/D コンバータ (ADC) で、広い動的範囲と内部キャリブレーション機能を提供し、エネルギー計測、電力品質、保護アプリケーションに最適です。

ADC 入力を分圧抵抗回路や変圧器に直接接続して電圧や電流を測定でき、Rogowski コイルに接続して電流を測定することもできます。

個々の ADC チャネルは、センサ入力に応じて個別に構成可能です。低ノイズのプログラマブル ゲイン アンプ (PGA) により、1~128 の範囲のゲインで低レベルの信号を增幅できます。また、これらのデバイスにはチャネル間位相アライメントレジスタ、オフセットおよびゲイン キャリブレーション レジスタが内蔵されており、信号チェーンのエラーを除去するのに役立ちます。本デバイスには低ドリフトの 1.2V リファレンス電圧が内蔵されているため、プリント基板 (PCB) の面積を削減できます。データ入力、データ出力、レジスタ マップについて個別に巡回冗長性検査 (CRC) オプションを有効にすることで、通信の整合性を確保できます。このデバイスのブロック図を、図 2-3 に示します。

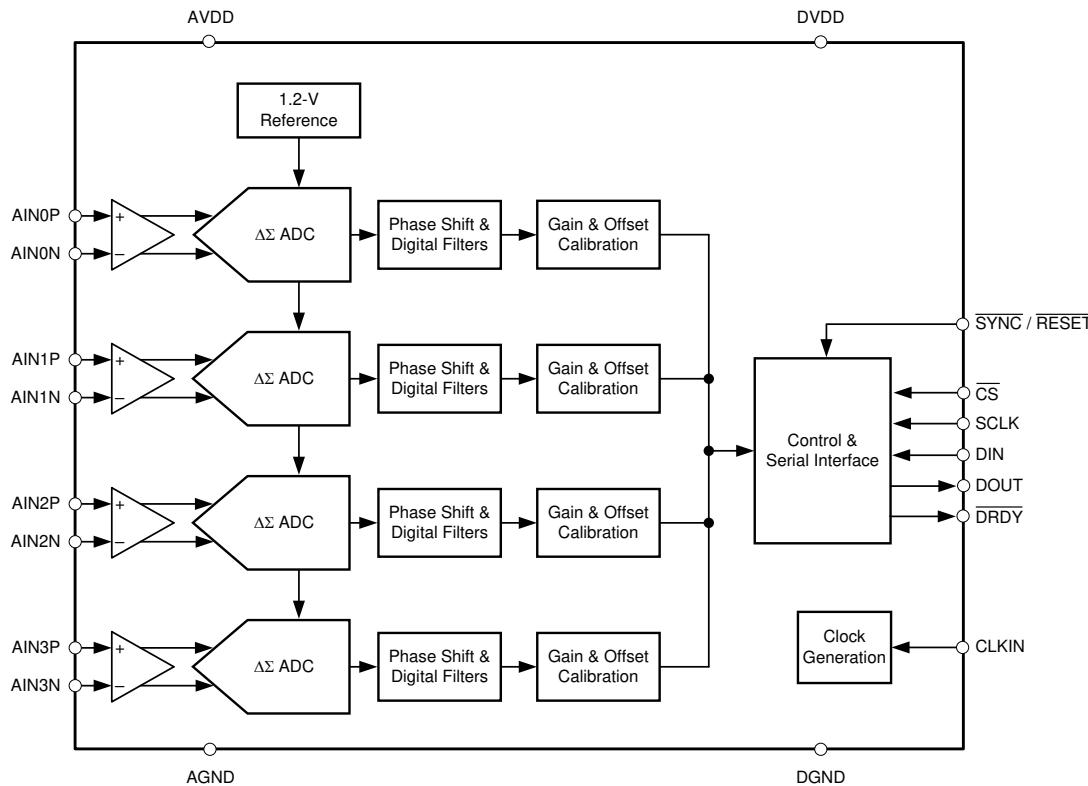


図 2-3. ADS131M04 の機能ブロック図

図 2-3 では、2.7V~3.6V の電圧を AVDD と AGND の間に、および DVDD と GND の間に印加する必要があります。また、外部クロックを CLKIN に接続する必要があります。ADS131M04 デバイスが高解像度モードに設定されている場合、このクロックは 1MHz から 8.3MHz の範囲である必要があります。これにより、ADS131M04 が適切に動作します。

ADS131M04 デバイスの CLKIN クロックは、MSP432 MCU の SMCLK クロック出力から生成することができます。

ADS131M04 はこのクロックを 2 で割り、割り算されたクロックをデルタシグマ変調器のクロックとして使用します。新しい ADC サンプルが準備できると、ADS131M04 は DRDY ピンをアサートして、ホスト MCU に新しい ADC サンプルが利用可能であることを通知します。ADS131M04 デバイスは広範な周波数範囲のクロックを受け入れることができますため、同時サンプリングが必要なアプリケーションにも使用できます。

2.2.2 MSP432P4111

SimpleLink™ MSP432P4111 MCU は、FPU および DSP 拡張機能を搭載した超低消費電力の性能を実現する最適化された MCU です。このデバイスは、浮動小数点演算ユニットとメモリ保護ユニットを備えた Arm® 32 ビット Cortex®-M4F CPU、リアルタイム クロック、LCD ドライバ、ポート マッピング可能な GPIO、AES 暗号化および復号化アクセラレータ、複数のシリアル通信オプションを搭載しています。MSP432P4111 デバイスは、Wi-Fi®、Bluetooth® Low Energy、Sub-1 GHz、ホスト MCU で構成される SimpleLink MCU プラットフォームの一部です。これらのすべてのデバイスは、シングルコアのソフトウェア開発キット (SDK) と豊富なツール セットを持つ、共通の使いやすい開発環境を共有しています。

このデザインの MSP432 MCU は、ADS131M04 デバイスから電圧および電流のサンプルを取得し、計測パラメータを計算します。さらに、このデバイスは RTC モジュールで時刻を追跡し、内部 LCD ドライバ モジュールを使用して基板上の LCD を駆動し、ボードの絶縁 RS-232 または絶縁 RS-485 回路を介して、UART インターフェイスの 1 つを使用して PC GUI と通信します。MSP432 MCU の CRC モジュールは、ADS131M04 デバイスから送信された ADC パケットの整合性を確認するために行われる CRC 計算を高速化するためにも使用されます。

2.2.3 TPS3840

TPS3840 ファミリの電圧スーパーバイザまたはリセット IC は、VDD と温度範囲の全体にわたって非常に小さな静止電流を維持しながら、高い電圧レベルで動作できます。TPS3840 デバイスは、低消費電力、高精度、短い伝搬遅延の最良の組み合わせを実現しています。

リセット出力信号は、VDD の電圧が負の電圧スレッショルド (V_{IT^-}) を下回ったとき、またはマニュアルリセットが論理 Low にされたとき (V_{MR_L}) にアサートされます。リセット信号は、VDD が V_{IT^-} にヒステリシスを加えた値 (V_{IT^+}) を上回り、マニュアルリセット (MR) がフローティングまたは V_{MR_H} を上回った状態で、リセット遅延時間 (t_D) が経過したとき、クリアされます。CT ピンのグランドにコンデンサを接続すると、高速リセット CT ピンをフローティングのままにできるため、リセット時間遅延をプログラムできます。追加の特長として、低いパワー オンリセット電圧 (V_{POR})、 \overline{MR} および VDD のグリッチ耐性保護機能の内蔵、ヒステリシスの内蔵、小さいオープンドレイン出力リーキ電流 ($I_{LKG(OD)}$) が挙げられます。

電力メータでは、いくつかのメーカーが、システム内のマイコンに既に内部 SVS が搭載されていても、外部 SVS デバイスを使用してマイコンをリセットすることを好みます。外部 SVS デバイスは、マイコン内の SVS を使用するよりも好まれることがあります。これは、外部デバイスがマイコンとは独立して機能するため、内部オプションよりもセキュリティが高くなる可能性があるためです。MSP432 MCU の SVS はこのアプリケーションには十分ですが、追加のセキュリティレベルを提供するために、TPS3840 の外部 SVS デバイスがこの設計に追加されています。外部 SVS デバイスは、商用電源から電力を供給される AC/DC レールのいずれかを監視し、商用電源の停電状態を早期に検出するためにも使用できます。

この設計では、TPS3840DL20 バリエーションを特に使用しています。このバリエーションは、V のスレッショルドとオープンドレインのアクティブ Low 出力を備えています。

2.2.4 TPS25921L

TPS25921 デバイスは、コンパクトで多機能な eFuse で、完全な保護機能を備えています。広い動作電圧範囲により、多くの一般的な DC バスを制御することができます。室温での $\pm 2\%$ の精密な電流制限により、優れた精度が提供され、TPS25921 デバイスは多くのシステム保護アプリケーションに適しています。4.5V から 18V で動作するすべてのシステムとアプリケーションに対して、堅牢な保護を提供します。ホット プラグイン ボードに対しては、デバイスは突入電流の制御とプログラム可能な出力ランプレートを提供します。

TPS25921 デバイスは、過電流保護および短絡保護を統合しています。高精度の過電流制限は、設計全体の入力電源を最小にするのに役立ちます。また、高速応答の短絡保護機能は、短絡が検出されたときに負荷を入力から即座に絶縁します。このデバイスでは、外付け抵抗を使用して、過電流制限スレッショルドを 0.4A～1.6A の範囲でプログラムできます。

このデバイスは、電圧バスのブラウンアウトおよび過電圧状態を精密に監視し、下流のシステムに対して故障をアサートします。スレッショルド精度は 3% であり、バスの厳密な監視が保証され、別途供給電圧監視チップを必要としません。

TPS25921 デバイスは、白物家電、STB、DTV、スマートメーター、ガス分析器などのシステムを保護するように設計されています。

デバイスのその他の特長：

- 過熱保護機能による、過電流事象発生時の安全なシャットダウン
- ブラウンアウトおよび過電圧の故障に対する故障報告
- ロック付きモードまたは自動再起動モードの選択

電力メータでは、多くのメーカーがデータを送信するためにワイヤレス通信を使用しています。これらの無線モジュールは、信号送信中に動作するために数百ミリアンペアから数アンペアの電流を必要とする場合があります。もしモジュールから引き込まれた電流がワイヤレス モジュールに割り当てられた電流を超えるような故障が発生した場合、電源供給が失敗する可能性があり、ワイヤレス モジュールと同じ電源を共有している場合、電流制限がないとメータの計測機能に影響を

与える可能性があります。計測がいつでも正しく正確に動作するようにするには、この電流スパイクを制御する方法が重要です。TPS25921 デバイスは、ワイヤレス通信モジュールに供給される電流を制限することで、この問題を解決します。

このデザインでは、この部品のラッチ付きバージョン (TPS25921L) を使用しているので、システムはサーマル シャットダウン発生後に eFuse がリセットされるタイミングを選択できます。過電流状況によって TPS25921L デバイスのサーマル シャットダウン イベントがトリガされると、デバイスがすばやく開き、FLT 信号がトリガされることで、電流が制限されます。この FLT 信号は、MSP432 MCU に供給され、イベントが発生したことを通知します。サーマル シャットダウンの発生後、MSP432 MCU は ENUV ピンを Low にしてデバイスをリセットし、ワイヤレス モジュールの電源を再度開始できます。この場合、過電流状態が解消されていると仮定します。

2.2.5 THVD1500

THVD1500 デバイスは、産業用アプリケーション向けの堅牢な半二重 RS-485 トランシーバです。バスのピンは高レベルの IEC 接触放電 ESD イベントへの耐性があるため、システム レベルでの追加保護部品が不要です。

このデバイスは、5V の単電源で動作します。広い同相モード電圧範囲とバス ピンでの低入力リークにより、THVD1500 は長いケーブルの接続でのマルチポイント アプリケーションに適しています。

THVD1500 デバイスは、業界標準の 8 ピン SOIC パッケージで提供されており、ドロップイン互換性があります。このデバイスは、-40°C～125°C の範囲で特性評価されています。また、TIA/EIA-485A 規格および中国国家電力公司 (SGCC) 第 11 部シリアル通信プロトコル RS-485 規格の要件を満たしており、これを上回っています。

この設計では、このデバイスが特に、UART から RS-485 信号への変換に使用されています。

2.2.6 ISO7731B

PC への RS-232 および RS-485 接続を絶縁するため、このリファレンス デザインの絶縁型 RS-232 および絶縁型 RS-485 部分は、光アイソレータよりも本質的に寿命が長い容量性ガルバニック絶縁を使用しています。特に、産業用デバイスは通常、消費者向け電子機器よりはるかに長い期間使用を強いられるため、15 年以上にわたって効果的な絶縁を維持することが重要です。

このリファレンス デザインの RS-232 と RS-485 回路で使用されている ISO7731B デバイスのバリアントは、UL 準拠で最大 5kV_{RMS} のガルバニック絶縁を 1 分間にわたって実現します。このデジタル アイソレータには 3 つの絶縁チャネルがあり、2 つのチャネルは順方向チャネル、もう 1 つは逆方向チャネルです。このデザインでは、TX と RX に 2 つの絶縁チャネルを使用します。通信に RS-485 が選択された場合、制御信号 (受信機またはドライバを有効にするための信号) 用に 3 番目の絶縁チャネルが使用されます。RS-232 を選択する場合、3 番目の絶縁チャネルは必要ありません。顧客のシステムで RS-485 の代わりに RS-232 が必要な場合、2 つの絶縁チャネルのみが必要です。そのため、3 チャネルの ISO7731B デバイスの代わりに、コスト削減のために 2 チャネルの ISO7721B デバイスを使用できます (ただし、これらの 2 つのデバイスはピン互換ではないことに注意してください)。各絶縁チャネルは、二酸化ケイ素 (SiO₂) の二重の容量性絶縁バリアで分離されたロジック入力および出力バッファを備えています。このチップは 100Mbps の信号速度をサポートしています。このチップは、2.5V、3.3V、5V の電源およびロジック レベルで動作できます。

2.2.7 TRS3232E

RS-232 規格と正しく接続するには、基板上の 3.3V ドメインとポート自体の 12V との間で変換を行う電圧変換システムが必要です。変換を容易にするため、この設計は TRS3232E デバイスを使用しています。TRS3232E デバイスは、RS-232 ポートの高電圧信号を、チャージ ポンプ システム経由の 3.3V DVCC のみで駆動できます。

TRS3232E デバイスは 2 つのライン ドライバ、2 つのライン レシーバ、1 つのデュアル チャージ ポンプ回路で構成されており、±15kV のピン間 (シリアル ポート接続ピン、GND を含む) ESD 保護機能を備えています。このデバイスは、TIA/EIA-232-F (Telecommunications Industry Association および Electronic Industries Alliance) の要件を満たし、非同期通信コントローラとシリアルポート コネクタの間の電気的インターフェイスとして機能します。チャージ ポンプと 4 つの小さな外付けコンデンサにより、3V～5.5V の单一電源で動作できます。本デバイスは最大 250kbps のデータ信号速度、最大 30V/μs のドライバ出力スルーレートで動作します。

2.2.8 TPS709

絶縁境界のデータ端末装置 (DTE) 側と RS-232 チャージポンプに電力を供給するには、2 つの方法があります。このインターフェイスは、絶縁型電源を実装することも、RS-232 ラインから電力をハーベストすることもできます。電源を搭載すると、システムのコストと複雑さが増大し、低コストのセンシング アプリケーションでは許容困難です。

このリファレンス デザインでは、RS-232 ポート自体から電力をハーベストする 2 番目の方法を実装するため、ほとんどの組込みアプリケーションでは無視されるフロー制御ラインを使用しています。RS-232 仕様 (ホストコンピュータまたはアダプタケーブルに適切に実装されている場合) では、ポートがアクティブのとき、送信要求 (RTS) およびデータ端末準備完了 (DTR) ラインを High に維持します。ホストが COM ポートを開いている限り、これら 2 本のラインは電圧を維持します。この電圧は、ドライバの実装によって 5V~12V の範囲で変動する可能性があります。この設計では、5V~12V で十分に使用できます。

この電圧はダイオードの配置を通過し、信号がピンに戻るのがブロックされます。この電圧によってコンデンサが充電され、エネルギーが蓄積されます。このコンデンサは、バリアとチャージポンプが瞬間に許可される量よりも多くの電流を消費するとき、エネルギーを解放します。TPS70933 デバイスは、ライン電圧を、チャージポンプおよび絶縁デバイスの動作電圧まで下げるために使用されます。

RS-232 回路での使用に加えて、追加の TPS709 デバイスを使用して、5V 入力電圧を、5V_IN レールから、基板上のほとんどの部品の電力として使用される 3.3V まで調整します。

TPS70933 リニアレギュレータは、電力に制約のあるアプリケーション向けに設計された、超低静止電流デバイスです。高精度のバンドギャップとエラー アンプにより、全温度範囲で 2% の精度を実現しています。静止電流がわずか 1 μ A であるため、アイドル時の消費電力を最小限に抑える必要のある常時オンのバッテリ駆動システムに最適なソリューションです。これらのデバイスは、サーマルシャットダウン、電流制限、逆電流保護機能により安全性が強化されています。これらのレギュレータは、EN ピンを Low にすることでシャットダウン モードに設定できます。このモードでのシャットダウン電流は、150nA (標準値) に低下します。

2.2.9 TVS1800

TVS1800 デバイスは、最大 40A の IEC 61000-4-5 故障電流を堅牢にシャントして、システムを高出力のトランジエントや落雷から保護します。一般的な産業用信号ラインの EMC 要件向けのソリューションとして、42 Ω のインピーダンスにより結合される、最大 $\pm 1\text{kV}$ の IEC 61000-4-5 開路電圧に耐えられます。TVS1800 デバイスは、独自の帰還メカニズムの採用により、フォルト時に高精度のフラットクランピングを実現し、システムがさらされる電圧を 25V 未満に抑えます。電圧レギュレーションが正確であるため、許容電圧の低いシステム部品を安心して選択でき、堅牢性を犠牲にすることなくシステムのコストと複雑さを抑えることができます。さらに、TVS1800 デバイスは、スペースが制約されたアプリケーションに最適な小型 2mm × 2mm の SON フットプリントで提供され、業界標準の SMA および SMB パッケージと比較して、サイズを 70 削減します。リーク電流と容量が極めて小さいため、保護するラインへの影響も最小限に抑えられます。製品の寿命全体にわたって堅牢な保護を確保するために、TI は TVS1800 デバイスを高温で 5,000 回の繰り返しサージストライクに対してテストし、デバイスの性能に変化がないことを確認しています。この設計では、過電流、過電圧、低電圧の各イベントで TPS25921L が負荷を切り離す際に発生する過渡電圧から保護するため、TVS1800 デバイスが TPS25921L の入力側に配置されています。

2.2.10 ISO7720

ISO772x デバイスは、高性能のデュアルチャネルデジタルアイソレータであり、UL 1577 準拠で 5000V_{RMS} (DW パッケージ) および 3000V_{RMS} (D パッケージ) の絶縁定格を備えています。これらのデバイスは VDE、TUV、CSA、CQC の認定も受けています。ISO772x デバイスは、CMOS または LVC MOS デジタル I/O を絶縁しながら、低消費電力で高い電磁気耐性と低い放射を実現します。各絶縁チャネルは、二酸化ケイ素 (SiO₂) の絶縁バリアで分離されたロジック入力および出力バッファを備えています。ISO7720 デバイスでは 2 つのチャネルが同じ方向で、ISO7721 デバイスでは 2 つのチャネルが逆方向です。入力電力または信号の喪失時、接尾辞 F のないデバイスではデフォルトの出力は高く、接尾辞 F のあるデバイスでは低くなります。革新的なチップ設計とレイアウト技術により、ISO772x デバイスの電磁的適合性が大幅に向上し、システムレベルの ESD、EFT、サージ、および放射線規制の準拠を容易にしています。ISO772x ファミリデバイスには、ワイドボディ(DW)の 16 ピン SOIC パッケージのものと、ナローボディ(D)の 8 ピン SOIC パッケージのものが用意されています。

メータの有効エネルギーと無効エネルギーの精度をテストするため、消費されるエネルギー量に比例するレートでパルスが出力されます。その後リファレンスマータが、これらのパルスと、メータに供給されるエネルギーの量に基づいて誤差を

計算し、電気メータの精度を判定できます。このリファレンス デザインでは、有効および無効エネルギーの累積消費量に対応したパルスが、ヘッダー経由で出力されます。ISO7720 デバイスを使用することで、非絶縁機器との接続のためにこれらのヘッダの絶縁バージョンが提供されます。特に、单一電圧動作に設定された設計では、設計が高電圧ライン接続のいずれかに基づいて参照されているため、これが必要です。この設計では、ISO7720 デバイスの D パッケージを使用します。これによって、これらの信号は絶縁電圧が 3000V_{RMS} になります。これらの絶縁された有効および無効信号は、絶縁側の VCC (ISO_VCC) と GND (ISO_GND) の間に選択した最大電圧出力を印加することで、最大電圧出力を 3.3V または 5V に設定できます。

2.3 設計上の考慮事項

2.3.1 ハードウェア実装の設計

2.3.1.1 電流制限回路

スマートメータでは、システム内の通信無線機への電流を制限することが望まれる場合がよくあります。通信デバイスの電流を制限することで、誤って発生した短絡や、メータを改ざんしようとする意図的な操作による不具合が計測機能に影響を与えるのを防ぐことができます。設計が正しく構成されている場合、ヘッダ J3 の電圧レールには電流制限がかかっており、これにより外部の無線機や無線モジュールに電源を供給しつつ、そのモジュールで短絡が発生しても計測系やシステムの他の部分に影響を及ぼさないようにできます。図 2-4 に、このデザインで使用する電流制限回路を示します。

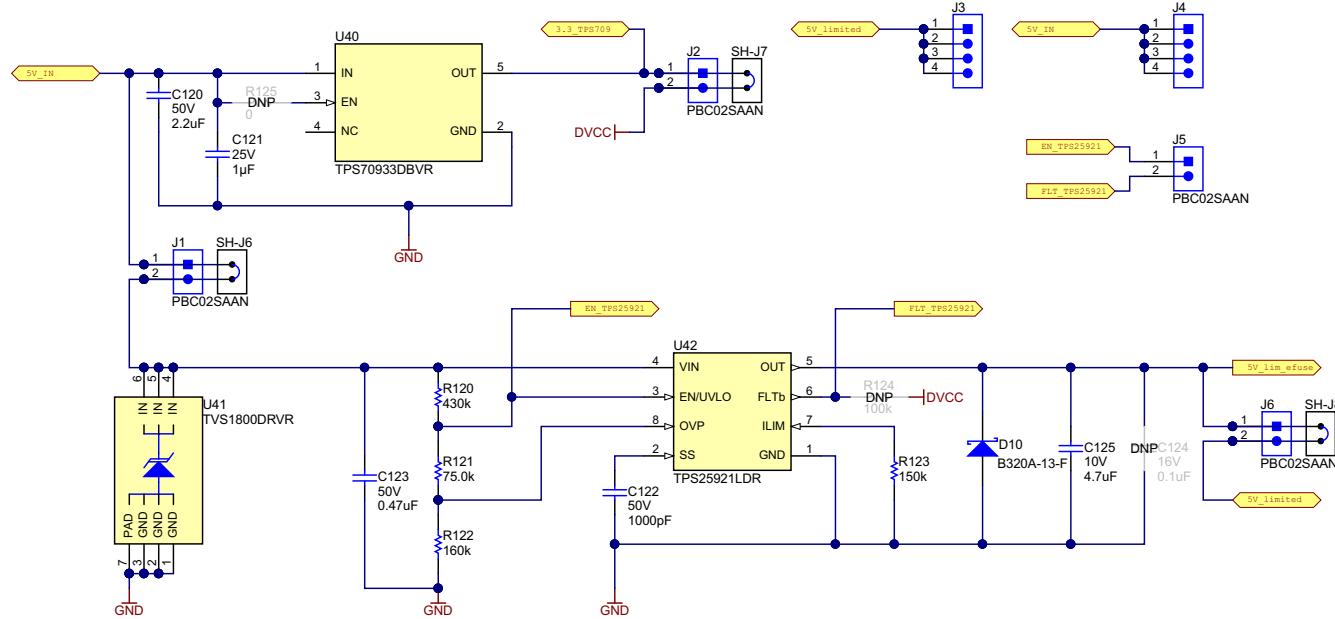


図 2-4. 電流制限回路

この設計における電流制限機能は、TPS25921L eFuse デバイスによって実現されています。このデバイスは、J4 ヘッダに接続された電源から電力を供給し、J3 ヘッダに接続された負荷を駆動します。正常に動作させるため、J4 に接続されたソースから供給される電圧として 5V を使用します。J4 に印加された 5V から、ADS131M04 デバイスおよび MSP432 MCU 用の 3.3V レールを生成できる TPS70933 LDO があり、これにより入力電圧レールを 1 系統にまとめることができます。

J4 に供給される電圧が (内部低電圧誤動作防止電圧に基づく) 4.036V を下回るか、5.78V を上回ると、J4 の電源は J3 の負荷から切り離されます。また、負荷から引き込まれた電流が 1.6A を超えるとサーマルシャットダウンが最終的にトリガされ、電流源は負荷から切り離されます。過電圧、低電圧、サーマルシャットダウンが発生すると、FLT_TPS25921 GPIO ピンが TPS25921L デバイスの FLTb ピンに接続されて Low にアサートされます。サーマルシャットダウンが発生中、EN_TPS25921 GPIO ピンがトグルされるまで、TPS25921L デバイスはオフのままでです。テストソフトウェアでは、過電流状態が直ちに解消され、かつそれ以前に過電圧、低電圧、サーマルシャットダウンがいずれも発生していない場合に限り、EN_TPS25921 GPIO ピンをトグルして TPS25921L デバイスをサーマルシャットダウン後にリセットします。

図 2-4 では、R120、R121、R122 は、目標とする過電圧スレッショルドに基づいて選択されています。また、R123 は、目的の電流制限に基づいて選択されます。過電圧および電流制限スレッショルドを変更するための R120、R121、R122、

R123 の新しい値の選定に関するための詳細情報は、[高精度な電流制限および過電圧保護機能を備えた TPS25921x 4.5V–18V eFuse データシート](#)を参照してください。この設計では、低電圧スレッショルドとして、内部低電圧誤動作防止電圧を使用しています。

電源を負荷から切断すると、TPS25921L の入力と出力で過渡事象が発生する可能性があります。スイッチングによって入力された過渡電圧から TPS25921L デバイスを保護するため、TVS1800 サージ保護デバイスを使用しています(図 2-4 の U41)。スイッチングによる過渡電圧から負荷を保護するため、ツェナーダイオード(図 2-4 の D10)を使用しています。

2.3.1.2

2.3.1.3 TPS3840 SVS

TPS3840 デバイスは外部電源電圧スーパーバイザ(SVS)で、MSP432 MCU を外部からリセットするために使用します。TPS3840 は静止電流が非常に小さいため、停電が発生してもデバイスを使用でき、メータはバックアップバッテリで動作します。MSP432 MCU には内部に SVS デバイスが搭載されているため、この用途には十分です。ただし、マイコンの内部 SVS ではなく外部 SVS を使用することで、マイコンとは独立しているため、マイコン自体に影響を与える問題の影響を受けにくいため、追加のセキュリティ層が提供されます。

この設計では、負の電圧スレッショルドが 2V の TPS3840DL20 デバイスのバリエーションが特別に使用されています。MSP432 MCU に電力を供給する電圧レールが 2V 未満に低下すると、TPS3840 デバイスは MSP432 MCU をリセットします。監視対象の電圧が、低電圧スレッショルドとヒステリシス電圧の値(合計で約 2.1V)を加算した値を上回ると、ユーザー定義のリセット遅延時間 t_D が経過した後、TPS3840 の RESET ピンが High にプルされます。 t_D は、TPS3840 デバイスの CT ピンに接続されているコンデンサの値に基づいて決定されます。この設計では、0.33μF コンデンサを TPS3840 デバイスの CT ピンに接続しているため、リセット遅延時間は約 204ms になります。

TPS3840 デバイスには、プッシュプル出力とオープンドレイン出力の両方があります。オープンドレイン出力は、この設計に特に選択されています。これは、MSP432 MCU の JTAG 回路で 47kΩ のプルアップ抵抗が推奨されているためです。

2.3.1.4 アナログ入力

この設計のアナログ フロントエンドは、ADS131M04 デルタシグマスタンドアロン ADC で構成されています。

ADS131M04 コンバータはいずれも差動で、ピンの入力電圧が ±1.2V を超えないことが必要です(ゲイン = 1)。この入力電圧仕様を満たすには、電流入力と電圧入力を分割する必要があります。また、ADS131M04 デバイスは最低 -1.2V の電圧を検出できるため、商用電源からの AC 信号をレベルシフタなしで直接接続できます。このサブセクションでは、電圧チャネルと電流チャネルに使用するアナログ フロントエンドについて説明します。

2.3.1.4.1 電圧測定のアナログ フロントエンド

商用電源の公称電圧は 100 V ~ 240V であるため、ADC で検出できるように電圧をスケーリングして低減する必要があります。この電圧スケーリングに使用されるアナログ フロントエンドを、図 2-5 に示します。J28 では電圧が印加されます。

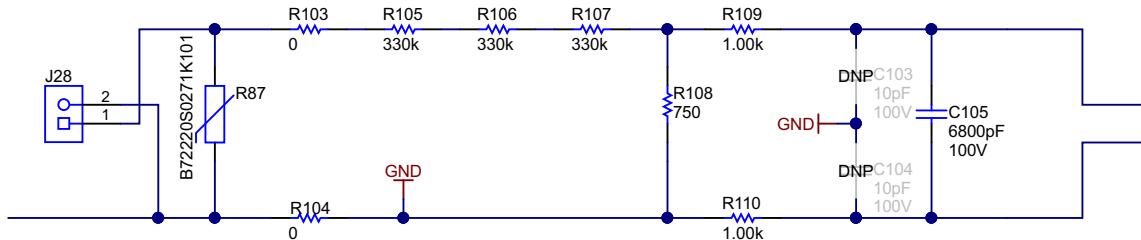


図 2-5. 電圧入力用のアナログ フロントエンド

電圧のアナログ フロントエンドには、スパイク保護用のバリスタ(R87)、電磁干渉フィルタビーズ用のフットプリント(抵抗フットプリント R103 および R104)、分圧器ネットワーク(R105、R106、R107、R108)、RC ローパス フィルタ(R109、R110、C103、C104、C105)があります。

電流が小さい場合、電圧から電流へのクロストークは、電力オフセットのキャリブレーションを行わなければ、電圧精度よりも有効エネルギーの精度に、はるかに大きな影響を及ぼします。これらの低電流時の精度を最大化するため、このデザインでは電圧チャネルに ADC 範囲全体を使用していません。ADS131M04 デバイスの ADC は高精度なので、この設計では電圧チャネルに使用する ADC 範囲を狭くしても、電圧を測定するのに十分な精度を実現できます。特定の商用電源電圧と、選択した分圧抵抗の値について、電圧 ADC チャネルに供給される差動電圧の範囲を計算する方法を、式 1 に示します。

$$V_{ADC_Swing,Voltage} = \pm V_{RMS} \times \sqrt{2} \left(\frac{R_{108}}{R_{105} + R_{106} + R_{107} + R_{108}} \right) \quad (1)$$

2 電圧構成を使用している場合、この式と、図 2-5 で選択した抵抗の値に基づいて、(ラインと中間の間で測定される) 商用電源電圧が 120V なら、電圧 ADC への入力信号の電圧スイングは $\pm 128mV$ ($91mV_{RMS}$) です。単一電圧構成の場合、120V の商用電圧 (ラインと中性線間で測定された場合) では、ライン間電圧が測定されるため、240V が 図 2-5 のフロントエンド回路に入力されます。フロントエンド回路への 240V 入力により、 $\pm 257mV$ ($182mV_{RMS}$) の電圧スイングが発生します。2 電圧構成および単一電圧構成の $\pm 128mV$ および $\pm 257 mV$ の電圧範囲は、いずれも ADS131M04 デバイスが選択された PGA ゲイン値 1 で使用される電圧チャネルにおいてセンシングできる $\pm 1.2V$ の入力電圧範囲内に収まっています。

注意すべき点は、ADS131M04 の AINxP および AINxN ピンのピン順序が、あるコンバータから別のコンバータに移行する際に入れ替わることです。たとえば、AIN2P はピン 7、AIN2N はピン 8、AIN3N はピン 9、AIN3P はピン 10 です。入れ替わった順序が原因で、位相 A の J28 電圧入力端子ブロックと位相 B の J29 電圧入力端子ブロック間で、正入力電圧と負入力電圧の順序が入れ替わっています。

2.3.1.4.2 電流測定のアナログ フロント エンド

電流入力のアナログ フロント エンドは、電圧入力のアナログ フロント エンドとは異なります。電流チャネルに使用されるアナログ フロント エンドを、図 2-6 に示します。この図では、CT からの正と負のリードが、ヘッダー J26 のピン 1 とピン 3 に接続されています。

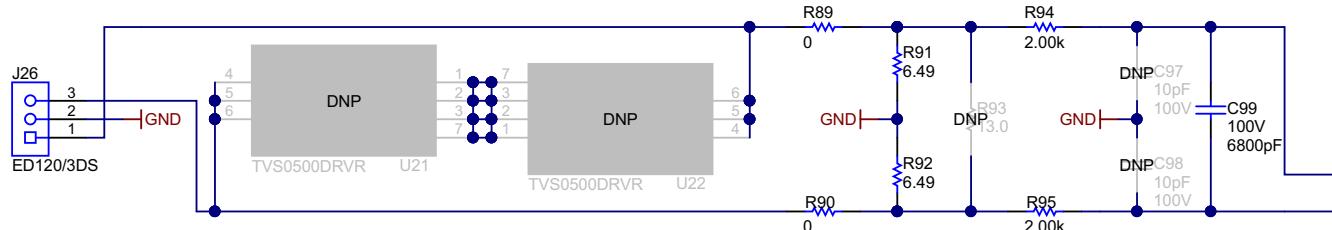


図 2-6. 電流入力のアナログ フロント エンド

電流のアナログ フロント エンドは、電磁干渉フィルタビーズ (R89 と R90)、電流トランス用の負荷抵抗 (R91 と R92)、アンチエイリアス フィルタとして機能する RC ローパス フィルタ (R94, R95, C97, C98, C99) のフットプリントで構成されます。必要に応じて、サーボからの追加保護のために、フットプリント (U21 および U22) を TVS0500 に交換することもできます。

図 2-6 に示すように、抵抗 R91 と R92 は負荷抵抗で、直列に接続されています。THD 性能を高くるため、1 つの負荷抵抗ではなく 2 つの同一の負荷抵抗を直列にし、共通のポイントで GND に接続しています。この分割負荷抵抗構成により、ADC の正端子と負端子に供給される波形が 180 度位相が反対になることが確保され、これによりこの ADC で最も THD の結果が得られます。合計負荷抵抗は、使用する電流範囲と CT の巻線比仕様に基づいて選択します (この設計では、巻線比が 2000 の CT を使用します)。この設計の負荷抵抗の合計値は 12.98Ω です。

与えられた最大電流、CT 巻線比、負荷抵抗値について、電流 ADC チャネルに供給される差動電圧の範囲を計算する方法を、式 2 に示します。

$$V_{ADC_Swing,Current} = \pm \frac{\sqrt{2}(R_{91} + R_{92})I_{RMS,max}}{CT_{TURNS_RATIO}} \quad (2)$$

この設計は最大電流が 100A、CT の巻線比が 2000、負荷抵抗が 12.98Ω なので、メータの最大電流定格 (100A) が適用されたとき、電流 ADC への入力信号の電圧スイングは最大 $\pm 918\text{mV}$ ($649\text{mV}_{\text{RMS}}$) です。この $\pm 918\text{mV}$ の最大入力電圧は、電流チャネルについて選択された PGA ゲインの 1 について、デバイスの $\pm 1.2\text{V}$ の入力範囲に十分に収まっています。

注意すべき点は、ADS131M04 の AIN_{xP} および AIN_{xN} ピンのピン順序が、あるコンバータから別のコンバータに移行する際に入れ替わることです。たとえば、AIN0P はピン 3、AIN0N はピン 4、AIN1N はピン 5、AIN1P はピン 6 です。順序が入れ替わっているため、位相 A の J26 電流入力端子ブロックと位相 B の J27 電流入力端子ブロック間で、CT の正出力端子と負出力端子の順序が入れ替わっています。

2.3.2 計測テスト用のソフトウェアを実装する方法

この設計の評価に使用する MSP432 ソフトウェアは、テスト用ソフトウェアです。このセクションでは、計測テスト用のカスタムソフトウェアを実装する方法を理解できるよう、テスト用ソフトウェアの機能について説明します。最初のサブセクションでは、ADS131M04 デバイスの設定と MSP432 MCU 上のさまざまなペリフェラルについて説明します。また、計測ソフトウェアについてフォアグラウンド プロセスとバックグラウンド プロセスの 2 つの主なプロセスに分けて説明します。

このリファレンス デザインに含まれているテスト データは、汎用テスト コードを使用して取得されたものです。このテスト コードはその後、エネルギー計測ライブラリ ソフトウェアとしてさらに開発されました。

すべての新しい設計に対して、TI は ADC エネルギー計測ライブラリ ソフトウェア パッケージの使用を推奨しています。このソフトウェアには、ADC と ARM® Cortex®-Mx マイクロプロセッサ (MCU) との間で通信を可能にするハードウェア抽象化層と、エネルギー測定のための計測計算ライブラリが含まれています。このソフトウェア ライブラリは、ARM® Cortex®-M4 MSP432P マイクロプロセッサ上で開発およびテストされましたが、付属のハードウェア抽象化層を使用することで、他の ARM® Cortex®-Mx マイクロプロセッサにも移植可能です。ソフトウェアには、TIDA-010036 および TIDA-010037 リファレンス デザインから計測パラメータを表示するための Windows® PC GUI も含まれています。

2.3.2.1 構成

2.3.2.1.1 クロック

MSP432 MCU は、CPU クロック (MCLK) を 48MHz に設定し、サブシステム マスタ クロック (SMCLK) を 8.192MHz に設定するように構成されています。MCLK のクロック ソースは MSP432 MCU の内部 DCO であり、48MHz の周波数用に構成されています。SMCLK のクロック ソースは外部の 16.384MHz の水晶であり、内部で 2 で割られて 8.192MHz の SMCLK 周波数が生成されます。外部の 32.768kHz の水晶が、デバイスの補助クロック (ACLK) のクロック ソースとして使用されます。この ACLK クロックは、32.768kHz の周波数に設定されています。

2.3.2.1.2 ポート マップ

MSP432 MCU には、デジタル機能をポート ピンに柔軟にマッピングできるポート マッピング コントローラが搭載されています。他のピンにポート可能なデジタル機能のセットは、デバイスに依存します。特に MSP432 デバイスでは、EUSCIB0 SPI モジュールの SPI クロック、SOMI、および SIMO 機能は、ポート P2、P3、および P7 にポートするオプションとして利用可能です。さらに、SMCLK クロック出力は、ポート P2、P3、P7 への出力にも使用できます。テストソフトウェアでは、このポート マッピング機能が使用されて、PCB レイアウトの柔軟性が得られます。

ポート マッピング コントローラを使用して、次のマッピングが使用されます：

- PMAP_SMCLK (SMCLK クロック出力) → ポート P2.0 (ADS131M04 デバイスの CLKIN ピンに接続され、ADS131M04 の変調器クロックを生成するために使用されます。ただし、このマッピングは最初は有効ではなく、ADS131M04 が初期化された後にのみ有効になります。)。これは、基板上で SMCLK とラベル付けされた J32 ヘッダのピン 1 です
- PMAP_UCB0SIMO (EUSCIB0 SPI SIMO) → ポート P2.1 (ADS131M04 デバイスの DIN ピンに接続されています)。これは、ボード上で SPI DOUT とラベル付けされた J32 ヘッダのピン 2 です
- PMAP_UCB0SOMI (EUSCIB0 SPI SOMI) → ポート P2.2 (ADS131M04 デバイスの DOUT ピンに接続されています)。これは、ボード上で SPI DIN とラベル付けされた J32 ヘッダのピン 3 です。
- PMAP_UCB0CLK (EUSCIB0 SPI クロック) → ポート P2.3 (ADS131M04 デバイスの SCK ピンに接続されています)。これは、ボード上で SPI CLK とラベル付けされた J32 ヘッダのピン 4 です

2.3.2.1.3 GUI 通信用の UART のセットアップ

MSP432 MCU は、このリファレンス デザインの RS-232 または RS-485 接続を使用して、PC の GUI と通信するように構成されています。MSP432 MCU は、9600 ポーレートで 8N1 に設定された UART モジュールを使用して、PC の GUI と通信します。

2.3.2.1.4 リアルタイム クロック (RTC)

MSP432 MCU のリアルタイム クロック モジュールは、正確な 1 秒間隔の割り込みを発生させ、必要に応じて時刻と日付を更新するように構成されています。

2.3.2.1.5 LCD コントローラ

MSP432P4111 MCU の LCD コントローラは、最大 8 マルチプレクス ディスプレイおよび 320 セグメント、または 4 マルチプレクス ディスプレイおよび 176 セグメント ディスプレイをサポートできます。現在の設計では、144 セグメントを使用して 4 マルチプレクス モードで動作するように LCD コントローラが構成されています。この設計では、4 マルチプレクス モードで使用されていない 8 つのセグメントラインを、ポートマッピング機能に使用します。このリファレンス設計では、LCD はリフレッシュ レートが ACLK / 64 に設定されており、これは 512Hz です。コントラスト制御のため、図 2-7 に示すように、R23, R13, R03 のピンと GND の間に外付け抵抗を追加します。

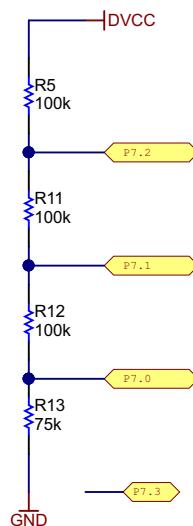


図 2-7. LCD 外付け抵抗

LCD が不要で、P7.0、P7.1、または P7.2 を外部無線モジュールとの通信などの他の機能に使用する場合は、図 2-7 の抵抗を取り外し、ソフトウェアを使用して目的のカスタム機能を実装します。

2.3.2.1.6 ダイレクトメモリアクセス (DMA)

ダイレクトメモリアクセス (DMA) モジュールは、MSP432 MCU と ADS131M04 デバイス間でパケットを転送し、MSP432 CPU からの帯域幅の要求を最小限に抑えます。ADS131M04 との通信には、2 つの DMA チャネルが使用されます。1 つのチャネル (チャネル 0) は ADS131M04 にデータを送信するために使用され、もう一つのチャネル (チャネル 1) は ADS131M04 からデータを受信するために使用されます。ADS131M04 から完全なパケットが受信されると、CRC 検証やパケット組み立てなど、必要な転送後処理を完了するための割り込みが生成されます。MSP432 MCU の DMA を使用して送受信されるパケットを、図 2-12 に示します。

2.3.2.1.7 ADC 設定

図 2-8 に、ADS131M04 の初期化に使用されるプロセスを示します。MSP432 MCU がリセットされた後で ADS131M04 が最初にセットアップされると、このプロセスは行われ、それ以外にもキャリブレーションの実行ごとに行われます。

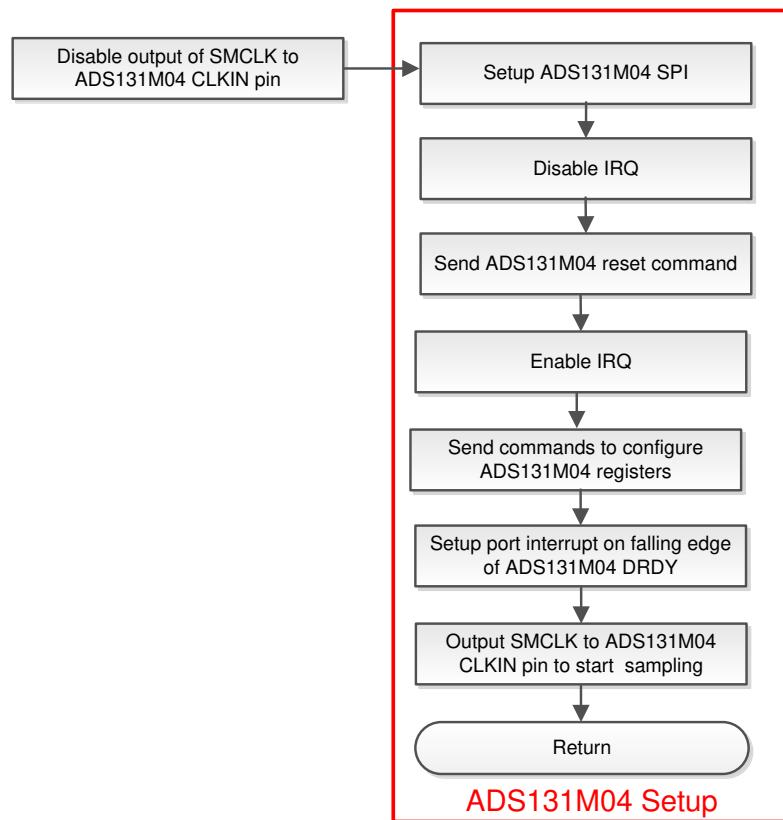


図 2-8. ADC の初期化と同期のプロセス

ADS131M04 デバイスを設定する前に、ADS131M04 のモジュレータクロックを無効にし、設定中に ADS131M04 が新しいサンプルを生成しないようにします。ADS131M04 の CLKIN ピンに供給される MSP432 MCU の SMCLK 出力を無効にすることで、変調器のクロックが無効になります。SMCLK 出力の無効化は、較正す後にのみ実施すればよく、MSP432 MCU のリセット後に行う必要はありません。これは、MSP432 MCU がリセットされると、自動的に SMCLK クロック出力が無効になるためです。

SMCLK 出力を無効化した後、MSP432 MCU の EUSCIB0 SPI モジュールが ADS131M04 デバイスとの通信のために設定されます。EUSCIB0 SPI モジュールは、マスタ デバイスとして構成され、3 線式モードで動作します (チップセレクト信号は SPI モジュールの機能を使わず、テストソフトウェア内で手動で High/Low に制御されます)。SPI クロックは 8.192 MHz で、8.192 MHz の SMCLK クロックから生成されます。SPI のセットアップ後、すべての割り込みがディセーブルされ、リセット コマンドが MSP432 MCU から SPI 経由で ADS131M04 に送信されます。割り込みを再度有効化した後、MSP432 MCU は ADS131M04 にコマンドを送信し、そのレジスタを設定します。

この時点では、MSP432 MCU から変調クロックはまだ出力されていないため、サンプリングはまだ開始されていません。ADS131M04 にコマンドを送信して ADS131M04 のレジスタを初期化することで、ADS131M04 は次のように構成されます：

- MODE レジスタの設定: 16 ビットの CCITT CRC を使用、ADS131M04 パケットの各ワードは 24 ビット長、イネーブル中で最も遅延しているチャネルで $\overline{\text{DRDY}}$ 信号をアサート、変換値が利用できないとき $\overline{\text{DRDY}}$ を High にアサート、変換値の準備ができたとき $\overline{\text{DRDY}}$ を Low にアサート
 - GAIN1 レジスタの設定: 4 つの ADC チャネルすべての PGA ゲインとして 1 を使用
 - CFG レジスタの設定: 電流検出モードがディセーブル
 - CHx_CNG レジスタの設定 (x はチャネル番号)
 - 2 電圧モード: 4 つすべての ADC チャネル入力を外部 ADC ピンに接続し、各チャネルの位相遅延を 0 に設定します (なお、ADS131M04 のハードウェア位相補正ではなく、ソフトウェア位相補正が使用されます)
 - 単一電圧モード: チャネル 0, 1, および 2 の入力を外部 ADC ピンに接続し、チャネル 0, 1, および 2 の位相遅延を 0 に設定します (なお、ADS131M04 のハードウェア位相補正ではなくソフトウェア位相補正が使用されます)。チャネル 3 はこの構成では使用されないため、チャネル 3 の設定レジスタは変更しません。

- CLOCK レジスタの設定: 512 の OSR、すべてのチャネルがイネーブル、高分解能変調器の電力モード

ADS131M04 レジスタが正しく初期化された後、MSP432 MCU は DRDY ピンで立ち下がりエッジが発生するたびにポート割り込みを生成するように設定されます。これは、ADS131M04 で新しい測定サンプルが利用可能なことを示しています。次に、MSP432 MCU が SMCLK クロックを ADS131M04 に出力し、電圧および電流のサンプリングが開始されます。

ADS131M04 の変調クロックは、CLKIN ピンに入力されるクロックから生成されます。このクロックは MSP432 MCU の SMCLK 出力から供給されます。ADS131M04 デバイスの CLKIN ピンに供給されるクロックは内部で 2 分周され、ADS131M04 変調器のクロックを生成します。したがって、ADS131M04 のサンプリング周波数は、 $f_s = f_M/OSR = f_{CLKIN} / (2 \times OSR)$ として定義されます。ここで、 f_s はサンプリングレート、 f_M は変調器クロック周波数、 f_{CLKIN} は ADS131M04 の CLKIN ピンに供給されるクロック、OSR は選択したオーバーサンプリング比です。この設計では、MSP432 MCU の SMCLK クロック(ADS131M04 の CLKIN ピンに入力される信号)の周波数は 8.192 MHz です。オーバーサンプリングレートは 512 に設定されています。その結果、ADS131M04 変調器のクロックは 4.096MHz に設定され、サンプリングレートは毎秒 8000 サンプルに設定されます。

2 電圧システムでは、それぞれの線対中性線電圧を測定するために、少なくとも 4 つの ADC チャネルが必要です。これにより、2 つの電圧と 2 つの電流を独立して測定できます。この設計では、2 電圧構成においてソフトウェア上で次の ADS131M04 のチャネル割り当てが使用されています:

- AIN0P および AIN0N ADS131M04 ADC チャネル ピン → 電流 I1 (位相 A 電流)
- AIN1P および AIN1N ADS131M04 ADC チャネル ピン → 電流 I2 (位相 B 電流)
- AIN2P および AIN2N ADS131M04 ADC チャネル ピン → 電圧 V1 (位相 A のラインから中性線までの電圧)
- AIN3P および AIN3N ADS131M04 ADC チャネル ピン → 電圧 V2 (位相 B のラインから中性線までの電圧)

平衡な分割位相システムでは、各ラインから中性線への電圧をライン間電圧の半分にする必要があります。このデザインの単一電圧構成では、ライン間電圧のみが測定されます。ライン間電圧の読み取り値は 2 で除算され (この除算はキャリブレーションプロセスに従って自動的に行われます)、各相のライン間電圧が取得されます。その結果、ソフトウェアで同じ ADC サンプルを使用して、2 相の RMS 電圧と電力を計算できます。この構成では、3 つの ADC チャネルを使用します。1 つはライン間電圧を測定し、もう 2 つは 2 つの電流に使用されます。この設計では、単一電圧構成においてソフトウェア上で次の ADS131M04 のチャネル割り当てが使用されています:

- AIN0P および AIN0N ADS131M04 ADC チャネル ピン → 電流 I1 (位相 A 電流)
- AIN1N および AIN1P ADS131M04 ADC チャネル ピン → 電流 I2 (位相 B 電流)
- AIN2P および AIN2N ADS131M04 ADC チャネル ピン → ライン間電圧 (位相 A のライン電圧 - 位相 B ライン電圧)
- AIN3P および AIN3N ADS131M04 ADC チャネル ピン → 電流 N (中間電流)

单一電圧構成で測定される線間電圧は、「位相 B のライン電圧 - 位相 A のライン電圧」ではなく「位相 A のライン電圧 - 位相 B のライン電圧」であるため、位相 B の電流の向きを反転させる必要があります。これは、位相 B の電流トランジスタの正負出力端子の接続を入れ替える、設計内で位相 B 電流入力に供給する電流の極性を反転させる、または位相 A と同じ入力電流および CT 出力端子の極性を使用し、ソフトウェア上で電流チャネルの ADC チャネルを反転させることで実現できます。2 電圧モードから 1 電圧モードに切り替えるときにハードウェアを変更しないように、このリファレンス デザインは、テストソフトウェアで位相 B 電流チャネルの値を無視するオプションを選択することで、電流チャネルの極性を反転させます。

2.3.2.2 フォアグラウンド プロセス

フォアグラウンド プロセスには、デバイスのリセット直後に行われる MSP432 のハードウェアおよびソフトウェアの初期設定と、ADS131M04 のレジスタ設定が含まれます。このプロセスのフローチャートを、図 2-9 に示します。

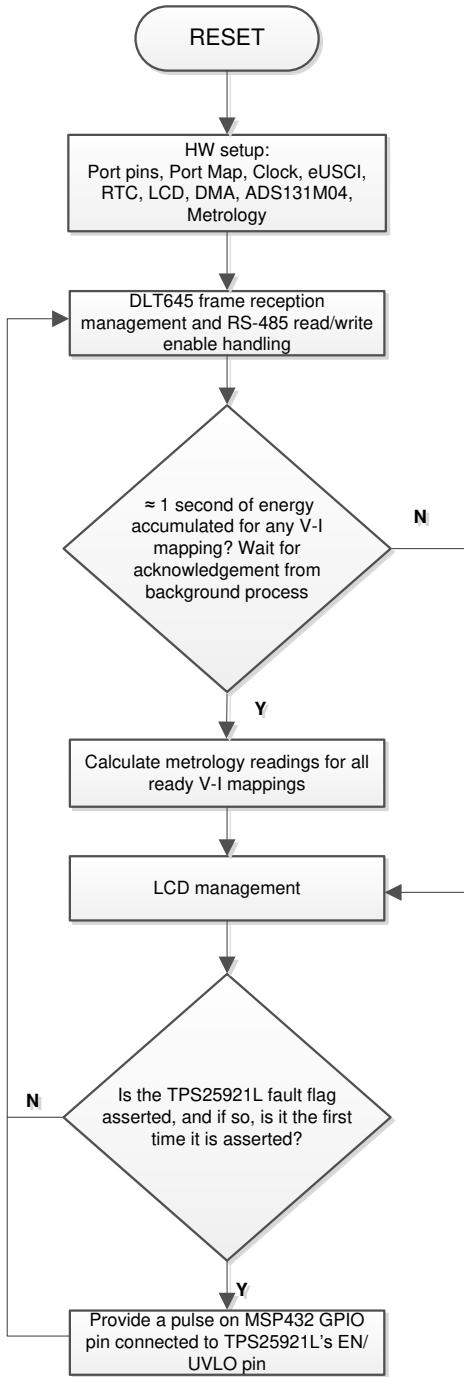


図 2-9. フォアグラウンド プロセス

初期化ルーチンには、MSP432 の汎用入出力 (GPIO) ポートピンおよび関連するポートマップ コントローラ、MSP432 のクロックシステム、UART 機能用の MSP432 USCI_A0、クロック機能用の MSP432 RTC モジュール、MSP432 LCD、MSP432 DMA、ADS131M04 のレジスタ、そして MSP432 の計測用変数の設定が含まれます。

ハードウェアのセットアップ後、GUI から受信したフレームがすべて処理されます。PC の GUI との通信用に RS-485 を選択した場合、THVD1500 デバイスは、PC の GUI からパケットを受信して、応答を GUI に返信できるよう、適切な時点

で RE および DE ピンを駆動し、レシーバとドライバをイネーブルする必要があります。MSP432 MCU から PC GUI にパケットが送信された後で、フォアグラウンド プロセスはパケットが MSP432 MCU から完全に送出された後、かつ GUI が次のパケットを送出する前に、RE および DE ピンをアサートします。

その後で、フォアグラウンド プロセスは、バックグラウンド プロセスからフォアグラウンド プロセスに、電圧と電流のマッピングについて新しい計量パラメータを計算するようにという通知があったかどうかをチェックします。この通知は、処理可能なデータのフレームがあるときに「PHASE_STATUS_NEW_LOG」ステータス フラグがアサートされることで行われます。データフレームは、バックグラウンド プロセスで約 1 秒間累積された、処理済みのドット積で構成されます。これは、受信する電圧信号と同期して 50 または 60 サイクルのデータを累積することに相当します。さらにサンプル カウンタは、このフレーム期間にわたって累積されるサンプルの数を追跡します。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。

処理されるドット製品には、 V_{RMS} 、 I_{RMS} 、有効電力、無効電力が含まれます。これらのドット積は、現実の単位で対応する計測値を計算するため、フォアグラウンド プロセスで使用されます。処理済みの電圧ドット積、電流ドット積、有効エネルギーのドット積、無効エネルギーのドット積は別の 64 ビット レジスタに累積され、以後の処理で RMS と平均値が得られます。フォアグラウンド プロセスの有効電力と無効電力の計算値を使用して、皮相電力が計算されます。周波数 (Hz 単位) と力率も、セクション 2.3.2.2.1 の式を使用してバックグラウンド プロセスで計算されたパラメータを使用して計算されます。

2 電圧構成では、2 つの電圧から電流へのマッピングがあり、それぞれのマッピングで異なる電圧チャンネルと電流チャネルが対応しています。具体的には、2 電圧マッピングでは、1 つのマッピングで位相 A のライン対ニュートラル 電圧測定と位相 A の電流測定が対応し、もう 1 つのマッピングで位相 B のライン対ニュートラル 電圧測定と位相 B の電流測定が対応しています。それ以外の場合、単一電圧構成では 1 つの電圧のみが測定されるため、各電圧電流のマッピングは各マッピングで同じ電圧になります。単一電圧構成では、ライン間電圧の測定値は、最初のマッピングではライン A 電流に関連付けられ、同じライン間電圧の測定が 2 番目のマッピングではライン B 電流に関連付けられます。単純化のため、2 電圧構成または単一電圧構成のいずれであっても、各電圧から電流へのマッピングは、このドキュメントの残りの部分と PC の GUI では位相と呼ばれていることに注意してください。

フォアグラウンド プロセスでも LCD が更新されます。LCD の表示項目は 2 秒ごとに変更されます。LCD に表示される各項目の詳細については、セクション 3.2.1.3.1 を参照してください。

また、TPS25921L デバイスの \overline{FLT} ピンが Low にアサートされている場合でも、フォアグラウンド プロセスはアクションを行います。これは、低電圧、過電圧、またはサーマル シャットダウンが発生したことを示しています。 \overline{FLT} ピンが Low にアサートされており、MSP432 MCU がリセットされてから初めてこの動作が発生する場合、MSP432 MCU は TPS25921L デバイスの EN/UVLO ピンにパルスを供給して、デバイスをリセットします。このリセット パルスは、サーマル シャットダウンによる故障で切断されていた場合に、TPS25921L の OUT ピン側の負荷を IN ピン側の電源と再接続するためのものです。TPS25921L をリセットした後に再び熱シャットダウンが発生すると、TPS25921L の出力は再度入力から切り離されます。さらに、MSP432 MCU は TPS25921L の出力を入力ラインに再接続するためのリセット パルスを、それ以上送信しません。

2.3.2.2.1 式

このセクションでは、電圧、電流、電力、エネルギーの計算に使用する式について簡単に説明します。以前に説明したように、電圧と電流のサンプルはサンプリング レート 8000Hz で取得されます。約 1 秒のフレームにおいて取得されたすべてのサンプルが保存され、各位相の電圧と電流の RMS 値を取得するために使用されます。RMS 値は、次の数式で求められます。

$$V_{RMS,ph} = K_{v,ph} \times \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample Count}} v_{ph}(n) \times v_{ph}(n)}{\text{Sample Count}}} - v_{offset,ph} \quad (3)$$

$$I_{RMS,ph} = K_{i,ph} \times \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample Count}} i_{ph}(n) \times i_{ph}(n)}{\text{Sample Count}}} - i_{offset,ph} \quad (4)$$

ここで、

- pH = 計算される位相パラメータ [すなわち、位相 A (= 1) または B (= 2)]
- $V_{ph}(n)$ = サンプル時 n における電圧サンプル
- $V_{offset, ph}$ = 電圧コンバータからの加算性白色ガウス雑音の影響を差し引くために使用されるオフセット
- $i_{ph}(n)$ = サンプル時 n における各電流サンプル
- $i_{offset, ph}$ = 電流コンバータからの加算性白色ガウス雑音の影響を差し引くために使用されるオフセット
- サンプル数 = 現在のフレーム内のサンプル数
- $K_{v, ph}$ = 電圧のスケーリング係数
- $K_{i, ph}$ = 電流のスケーリング係数

電力とエネルギーは、1 つのフレームの有効エネルギーと無効エネルギーのサンプルについて計算されます。これらのサンプルは位相補正され、フォアグラウンド プロセスに渡されます。フォアグラウンド プロセスは、サンプルの数 (サンプル数) を使用して、位相の有効電力と無効電力を次の式で計算します。

$$P_{ACT,ph} = K_{ACT,ph} \frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample Count}} V_{ph}(n) \times i_{ph}(n)}{\text{Sample Count}} - P_{ACT_Offset,ph} \quad (5)$$

$$P_{REACT,ph} = K_{REACT,ph} \frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample Count}} V_{90,ph}(n) \times i_{ph}(n)}{\text{Sample Count}} - P_{React_Offset,ph} \quad (6)$$

$$P_{APP,ph} = \sqrt{P_{ACT,ph}^2 + P_{REACT,ph}^2} \quad (7)$$

ここで、

- $V_{90}(n)$ = サンプル時「 n 」が 90° シフトした電圧サンプル
- $K_{ACT, ph}$ = 有効電力のスケーリング係数
- $K_{REACT, ph}$ = 無効電力のスケーリング係数
- $P_{ACT_offset, ph}$ = 他の位相および中間から有効電力測定へのクロストークの影響を差し引くために使用されるオフセット
- $P_{REACT_offset, ph}$ = 他の位相および中間から無効電力測定へのクロストークの影響を差し引くために使用されるオフセット

無効エネルギーの場合、次の 2 つの理由で 90° 位相シフト アプローチが使用されることに注意してください。

1. このアプローチにより、非常に小さい電流に対する無効電力を正確に測定できる
2. このアプローチは、IEC および ANSI 規格で規定されている測定方法に準拠している

計算された商用電源周波数を使用して、 90° シフトされた電圧サンプルを計算します。商用電源の周波数は変動するので、電圧サンプルをそれに応じて位相シフトするために、最初に商用電源の周波数を正確に測定します。

正確な 90° の位相シフトを得るには、2 つのサンプル間で補間を使用します。これら 2 つのサンプルにおいて、電流サンプルの前で電圧サンプルが 90° よりわずかに大きく、電流サンプルの使用前で電圧サンプルが 90° よりわずかに小さくなっています。アプリケーションの位相シフトの実装は、整数部と分数部で構成されています。整数部は、N サンプル遅延によって行われます。分数部は、1 タップの FIR フィルタにより実現されます。テストソフトウェアで、分数遅延の生成に使用されるフィルタ係数は、ルックアップ テーブルに示されています。

位相ごとの有効電力と無効電力の計算に加えて、これらのパラメータの累積和も、式 8、式 9、式 10 を使用して計算されます：

$$P_{ACT,Cumulative} = \sum_{ph=1}^2 P_{ACT,ph} \quad (8)$$

$$P_{REACT,Cumulative} = \sum_{ph=1}^2 P_{REACT,ph} \quad (9)$$

$$P_{APP,Cumulative} = \sum_{ph=1}^2 P_{APP,ph} \quad (10)$$

計算された電力を使用して、式 11 でエネルギーを計算します：

$$\begin{aligned} E_{ACT,ph} &= P_{ACT,ph} \times \text{Samplecount} \\ E_{REACT,ph} &= P_{REACT,ph} \times \text{Samplecount} \\ E_{APP,ph} &= P_{APP,ph} \times \text{Samplecount} \end{aligned} \quad (11)$$

ここから、式 12、式 13、式 14 によってエネルギーが累算され、累積エネルギーが計算されます：

$$E_{ACT,Cumulative} = \sum_{ph=1}^2 E_{ACT,ph} \quad (12)$$

$$E_{REACT,Cumulative} = \sum_{ph=1}^2 E_{REACT,ph} \quad (13)$$

$$E_{APP,Cumulative} = \sum_{ph=1}^2 E_{APP,ph} \quad (14)$$

次に、計算されたエネルギーがバッファに累積され、システムのリセット後に消費された合計エネルギー量が保存されます。これらのエネルギーは、エネルギー パルスの出力用にエネルギーを累算するため使用される作業変数とは異なることに注意してください。使用可能なバッファは、位相ごとに 1 つ、全位相の累算用に 1 つ、合計 4 セットです。バッファの各セットには、次のエネルギーが累算されます。

1. 有効なインポート エネルギー (有効エネルギー ≥ 0 のときは有効エネルギー)
2. 有効なエクスポート エネルギー (有効エネルギー < 0 のときは有効エネルギー)
3. 無効クワッド I エネルギー (無効エネルギー ≥ 0 、有効電力 ≥ 0 のときは無効エネルギー、誘導性負荷)
4. 無効クワッド II エネルギー (無効エネルギー ≥ 0 、有効電力 < 0 のときは無効エネルギー、容量性ジェネレータ)
5. 無効クワッド III エネルギー (無効エネルギー < 0 、有効電力 < 0 のときは無効エネルギー、誘導性ジェネレータ)
6. 無効クワッド IV エネルギー (無効エネルギー < 0 、有効電力 ≥ 0 のときは無効エネルギー、容量性負荷)
7. 皮相インポート エネルギー (有効エネルギー ≥ 0 のときは皮相エネルギー)
8. 皮相エクスポート エネルギー (有効エネルギー < 0 のときは皮相エネルギー)

バックグラウンド プロセスでは、商用電源サイクルあたりのサンプル数の形式で、周波数も計算されます。その後で、フォアグラウンド プロセスが、商用電源のサイクルあたりのサンプル数を 式 15 で Hz に変換します。

$$\text{Frequency (Hz)} = \frac{\text{Sample Rate (samples / second)}}{\text{Frequency (samples / cycle)}} \quad (15)$$

有効電力と皮相電力を計算した後で、力率の絶対値を計算します。システムの力率の内部表現では、正の力率は容量性負荷に対応し、負の力率は誘導性負荷に対応します。力率の内部表現の符号は、電流が電圧よりも先か後かによって決定され、これはバックグラウンド プロセスで決定されます。したがって、力率の内部表現は式 16 で計算されます。

$$\text{Internal Representation of Power Factor} = \begin{cases} \frac{P_{\text{Act}}}{P_{\text{Apparent}}}, & \text{if capacitive load} \\ -\frac{P_{\text{Act}}}{P_{\text{Apparent}}}, & \text{if inductive load} \end{cases} \quad (16)$$

2.3.2.3 バックグラウンド プロセス

電圧と電流のサンプリング時に発生するさまざまなイベントを、図 2-10 に示します。オリーブ グリーンの項目は、テストソフトウェアではなくハードウェア設定によって行われます。

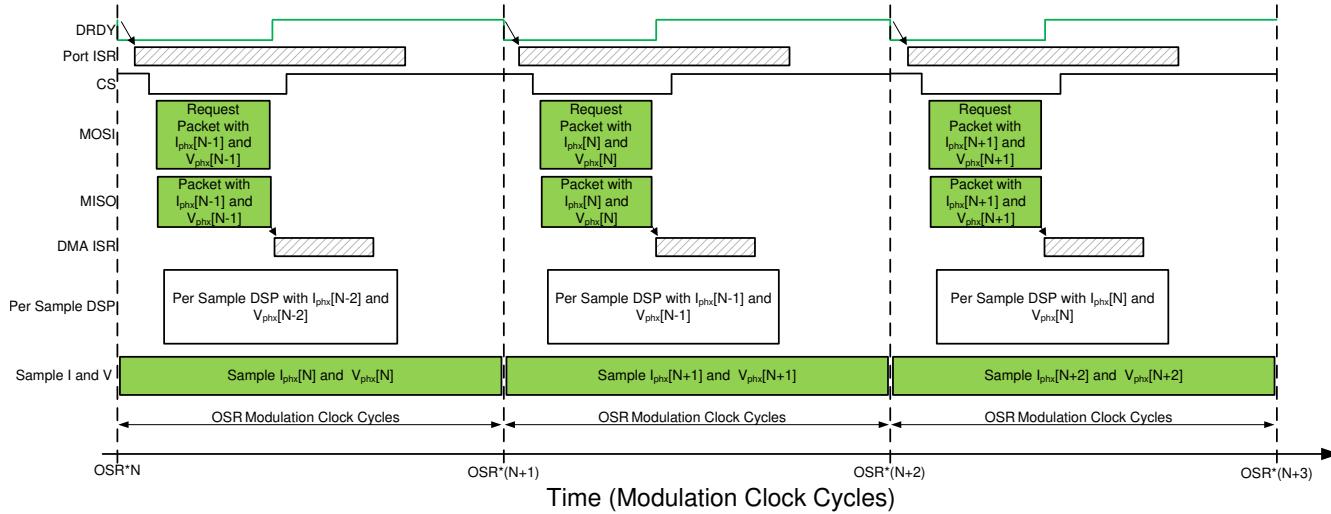


図 2-10. 電圧と電流のサンプリング イベント

図 2-10 に示されているプロセスを実行するため、各相について、すべての OSR ごと（この設計では 512 ごと）に、変調クロックサイクルごとに、新しい電流サンプルが準備されます。ADS131M04 デバイスからの最新の位相電流および電圧のサンプルが、N - 1 番目の電流および電圧のサンプル、または $I_{\text{phx}}[N - 1]$ および $V_{\text{phx}}[N - 1]$ に対応していると想定します。新しいサンプルの準備ができた時点で、ADS131M04 によって DRDY ピンが Low にアサートされます。

ADS131M04 の DRDY ピンで立ち下がりエッジが発生すると、MSP432 MCU 上の GPIO ポート割り込みが発生し、それによって MSP432 MCU のポート ISR がトリガれます。バックグラウンド プロセスはポート ISR 内で実行されます。バックグラウンド プロセスを図 2-11 に示します。このプロセスは主に、テストソフトウェアでタイミング クリティカルなイベントを処理します。

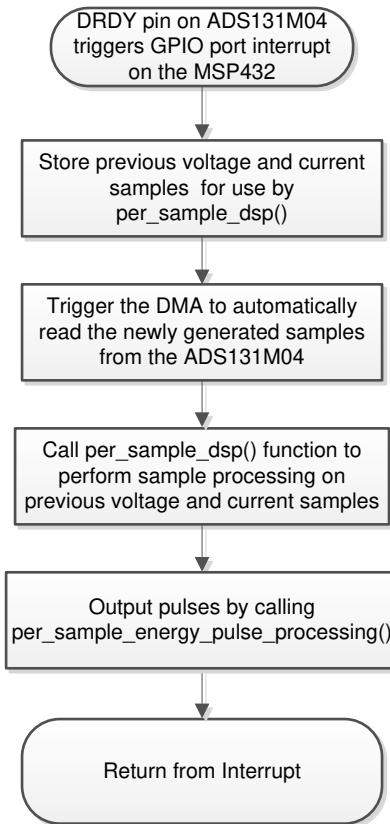


図 2-11. バックグラウンド プロセス

バックグラウンド プロセスでは、以前に取得した電圧サンプル ($V_{phx}[N - 2]$) と、以前に取得した電流サンプル ($I_{phx}[N - 2]$) が保存され、後から `per_sample_dsp` 関数で使用できます。この関数は、計測パラメータの計算に使用される中間ドット積の数量を更新します。以前に取得した電圧と電流のサンプルを保存した後、チップ セレクトを **Low** にアサートし、ADS131M04 との通信がイネーブルされます。次に DMA が、ADS131M04 デバイスの最新の電流と電圧のサンプル ($I_{phx}[N - 1]$ と $V_{phx}[N - 1]$) へのリクエストを送信し、ADS131M04 からのデータ パケット応答を受信するように構成されます。電流サンプルの要求および受信は、ソフトウェアではなく DMA モジュールによって自動的に実行されます。

MSP432 MCU の DMA によって送信されるパケットと、DMA によって受信および結合される ADS131M04 からの応答パケットを、図 2-12 に示します。送信および受信パケットには 6 ワードが含まれ、各ワードは 3 バイト長です。

MSP432 Transmit	Command[N+1] / Dummy Write (3 bytes = 0x000000)	Dummy Write (3 bytes= 0x000000)	Dummy Write (3 bytes= 0x000000)	Dummy Write (3 bytes= 0x000000)	Dummy Write (3 bytes= 0x000000)	Dummy Write (3 bytes= 0x000000)
	Response to Command[N]/Not used in design (3 bytes)	ADS131M04 Ch 0 Sample (3 bytes, MSB sent first)	ADS131M04 Ch 1 Sample (3 bytes, MSB sent first)	ADS131M04 Ch 2 Sample (3 bytes, MSB sent first)	ADS131M04 Ch 3 Sample (3 bytes, MSB sent first)	ADS131M04 Packet CRC (3 bytes, MSB sent first)

図 2-12. ADS131M04 ADC のサンプルリクエストパケット

ADS131M04 デバイスから ADC データを要求するとき、ADS131M04 に送信する必要がある最初のワードはコマンド ワードです。テストソフトウェアは、通常の ADC サンプル読み取り中に ADS131M04 の設定を変更したりレジスタを読み出したりする必要がないため、ADS131M04 に NULL コマンドを送信します。これにより、デバイスの状態を変えずに ADS131M04 から ADC サンプルを取得できます。NULL コマンドの実際のサイズは 16 ビットですが、24 ビットのワード

が使用されるため、16ビットコマンドの末尾に値 0x00 を追加してパディングする必要があります。したがって、送信される NULL コマンドワードの値は 0x00000000 です。MSP432 MCU がコマンドワードをシフト出力している間、同じ MSP432 は同時に、前のパケットのコマンドワードに対するレスポンスワードをシフト入力しています。NULL コマンドに対する応答ワードは、STATUS レジスタの内容です。この設計では STATUS レジスタの内容は使用しないため、ADS131M04 から最初に受信したワードは無視されます。

コマンドワードを書き込んだ後で、読み取る各バイトについてダミーの書き込みを行う必要があります。ADS131M04 デバイスからバイトを読み取るには、SPI クロックをイネーブルする必要があります、そのためにはダミー バイトの書き込みが必要です。ダミー バイトの書き込みごとに、EUSCIB0 の SPI 送信レジスタに値 0x00 が書き込まれます。コマンド バイトを書き込んだ直後に 3 バイトのダミーデータを書き込むことで、MSP432 MCU は ADS131M04 のチャネル 0 から 3 バイトの ADC 値を受信できます。続いて 9 バイトのダミー データを書き込むことで、チャネル 1、チャネル 2、およびチャネル 3 の ADC データをそれぞれ取得します。最後に、次の 3 つのダミー バイトを書き込むと、CRC ワードを取得します。CRC ワードは 24 ビットですが、実際の CRC は 16 ビットしかなく、24 ビットワードの最上位ビットに配置されています。このため、CRC ワードを解析するとき最後のバイトは必要ありません（ただし、ADS131M04 を適切に動作させるため、この 0 でパッドされたバイトのダミー書き込みは送信する必要があります）。

図 2-12 は、DMA が $I_{phx}[N - 1]$ パケットの全体を受信するたびに、ISR 内では、5 つのコマンドおよび ADC ワード（合計 15 バイト）にわたって CRC が計算されます。この CRC 計算では、MSP432 MCU の CRC モジュールを使用します。CRC モジュールは偶数バイト単位で動作しますが、利用可能なバイト数は合計で 15 バイトしかないため、CRC モジュールは最初の 14 バイトに対して使用されます。CRC モジュールの結果と 15 バイト目のデータを組み合わせて、最終的な CRC がソフトウェアで計算されます。この設計ではワード サイズが 3 バイトに設定されているため、最後の 1 バイトに対してソフトウェアで CRC 計算を行う必要があることに注意してください。ワード サイズの代わりに 2 バイトまたは 4 バイトを選択した場合、偶数のバイト数が存在するため、ソフトウェア CRC 計算は必要ありません。図 2-13 は、MSP432 CRC モジュールとソフトウェアを使用して 15 バイトを超える CRC を計算するコード スニペットを示します。

```
CRC32->INIIRES16 = 0xFFFF; // Init CRC16 HW module
for(i=0; i<CRC_BYTEN_START/2; i++) // This for loop uses the MSP432's CRC module for calculating CRC for first 14 bytes of packet
{
    CRC32->DIRB16 = (((uint16_t )packet[i<<1])<<8) | packet[(i<<1) +1];
    __no_operation();
}
CRC16_Result = (unsigned char) (CRC32->INIIRES16 >> 8) | (CRC32->INIIRES16 << 8); // Stores CRC result for first 14 bytes from CRC module
CRC16_Result ^= packet[CRC_BYTEN_START-1]; // packet[CRC_BYTEN_START-1] is the last (15th byte) not used by the CRC module's calculation
CRC16_Result ^= (unsigned char) (CRC16_Result & 0xFF) >> 4;
CRC16_Result ^= (CRC16_Result << 8) << 4;
CRC16_Result ^= ((CRC16_Result & 0xFF) << 4) << 1; // The final CRC result over 15 bytes is now stored in CRC16_Result after this line executes.
```

図 2-13. 奇数バイトに対して CRC を計算するために、MSP432 MCU の CRC モジュールを使用するコード スニペット

パケット全体の CRC を計算した後、それを ADS131M04 から送信されたパケット内の CRC と比較します。送信された CRC は、ADS131M04 パケットの 16 バイト目および 17 バイト目から解析されます。なお、18 バイト目は CRC ワードの一部ですがゼロでパディングされているため、解析には使用されません。計算された CRC と解析された CRC が等しい場合、CRC チェックは成功し、ADC データが解析されて、 $N - 1$ の時点での電圧および電流サンプルの値が得られます。解析された電圧および電流サンプルは一時バッファに格納され、次回の割り込みで per_sample_dsp 関数が呼び出される際に使用されます。DMA 割り込みが終了する前に、チップ セレクトラインを再び High に戻し、ADS131M04 から次の電流サンプルが準備される前に、ADS131M04 の通信を正しくリセットします。

DMA を使用して ADS131M04 から最新の電流サンプルを受信している間、ADS131M04 は次の電圧サンプル ($V_{phx}[N]$) および電流サンプル ($I_{phx}[N]$) を取得しています。同時に、テストソフトウェアは ADS131M04 から取得した前回の電圧サンプル ($V_{phx}[N-2]$) および電流サンプル ($I_{phx}[N-2]$) に対してサンプルごとの処理を実行します。このサンプルごとの処理を使用して、計測パラメータの計算に使用される中間ドット積の数量を更新します。サンプル処理の後、バックグラウンド プロセスは、エネルギー比例パルスの計算と出力に「per_sample_energy_pulse_processing」を使用します。per_sample_energy_pulse_processing が完了すると、テストソフトウェアはポート ISR を終了します。

2.3.2.3.1 per_sample_dsp()

per_sample_dsp() 関数のフロー チャートを、図 2-14 に示します。per_sample_dsp() 関数は、中間ドット積結果の計算に使用され、その結果をフォアグラウンド プロセスに送り、計測読み取り値が計算されます。電圧と電流の両方のサンプルが処理され、専用の 64 ビット レジスタに累算されます。位相ごとの有効電力と無効電力も、64 ビット レジスタに累算されます。

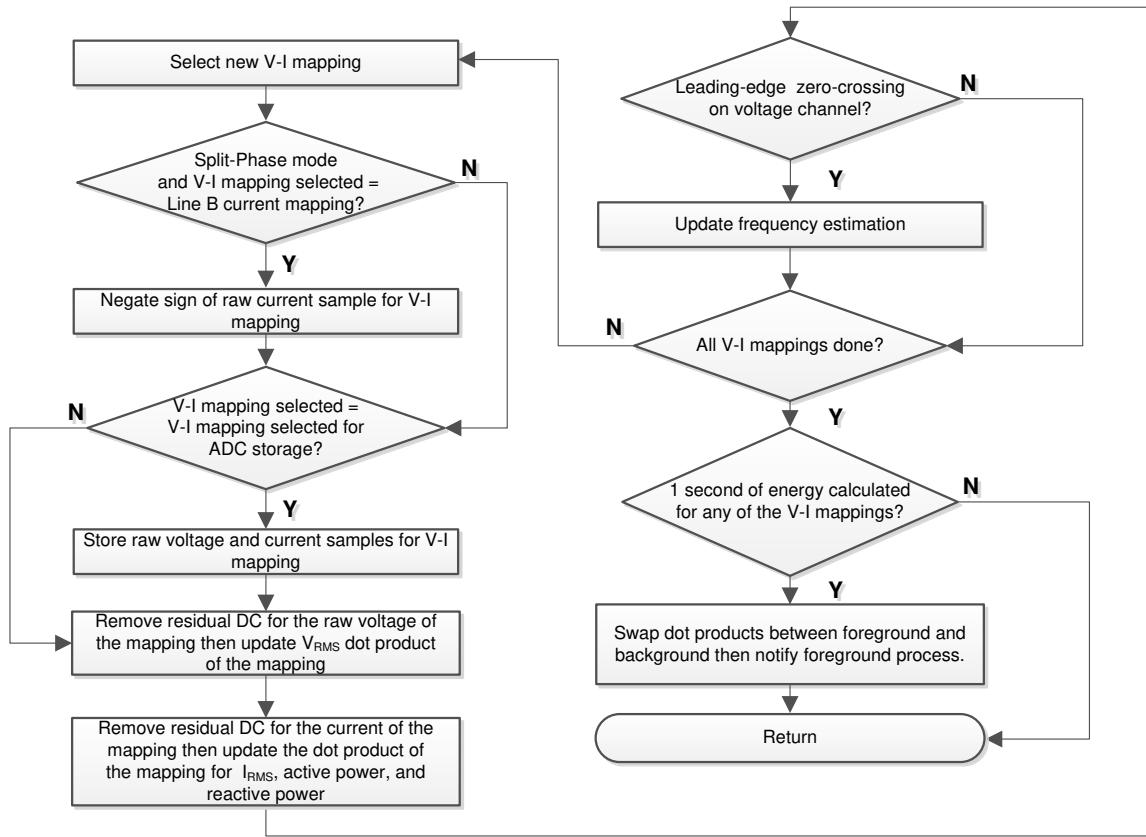


図 2-14. per_sample_dsp 関数

十分なサンプル(約 1 秒分)が累算された後で、フォアグラウンド機能がトリガされ、 V_{RMS} 、 I_{RMS} 、有効電力、無効電力、皮相電力、有効エネルギー、無効エネルギー、皮相エネルギー、周波数、力率の最終値が計算されます。テストソフトウェアには、位相に対応する 2 つのドット積のセットがあります。どの時点でも、片方がフォアグラウンドで計算に使用され、もう片方はバックグラウンドでワーキング セットとして使用されます。バックグラウンド プロセスが十分なサンプルを取得した後、2 つのドット積を交換します。これにより、フォアグラウンドはバックグラウンド プロセスが計算したばかりの新しく取得したドット積を使用し、バックグラウンド プロセスは次のドット積を計算するために新しい空のセットを使用します。電圧チャネルにリーディング エッジのゼロクロス(-から+への電圧遷移)が存在する場合、per_sample_dsp() 関数も位相の対応する周波数(サイクルあたりのサンプル数)を更新します。

以降のセクションでは、per_sample_dsp() 関数での電気測定のさまざまな要素について説明します。

2.3.2.3.1.1 電圧と電流の信号

単一電圧構成の場合、電力の読み取りが適切な符号になるように、ライン B の電流測定の向きをライン間電圧測定に対して逆にします。ライン B の電流測定の向きを切り替えるために CT 接続を逆にする代わりに、単一電圧構成ではライン B の生の電流サンプルが反転されます。これにより、CT の基板の接続を再配線することなく、ソフトウェアで二重電圧構成と単一電圧構成を切り替えることができます。この設計のテストソフトウェアは、単一電圧構成または二重電圧構成が選択されているかどうかに関係なく、位相 A または位相 B の未加工の電圧および電流の ADC 値を保存する機能をサポートしています。

未加工の ADS131M04 のサンプルは、符号付き整数であり、これらのコンバータでの浮遊 DC 値またはオフセット値は、DC ラッピング フィルタを使用して除去します。フィルタ、電圧、電流の各サンプルを使用して、すべての電圧と電流に対して個別の DC 推定値が取得されます。その後この推定値が、各電圧および電流の未加工 ADC サンプルから減算されます。

結果として得られる瞬間的な電圧および電流のサンプルを使用して、次の中間結果を生成します。

- 電圧と電流の 2 乗の累算値が、それぞれ V_{RMS} と I_{RMS} の計算に使用されます
- 累算エネルギー サンプルが、有効エネルギーを計算するために使用されます

- 電流と 90° 位相シフトされた電圧を使用する累算エネルギー サンプルが、無効エネルギーを計算するために使用されます

フォアグラウンド プロセスは、これらの累算値を処理します。

2.3.2.3.1.2 周波数測定とサイクル トラック

瞬間的な電圧、電流、有効電力、無効電力は、64 ビットのレジスタで累算されます。サイクル トラック カウンタとサンプル カウンタは、累算されたサンプル数を追跡します。約 1 秒のサンプルが累算されると、バックグラウンド プロセスによってこれらの累算レジスタが保存され、フォアグラウンド プロセスに通知が行われ、RMS や電力値などの平均結果が得られます。このプロセスでは非常に安定した結果が得られるため、フォアグラウンド 平均化 プロセスをトリガするためにサイクル境界が使用されます。

周波数測定では、ゼロクロス電圧サンプル間で線形補間が使用されます。ゼロクロス付近のサンプルと、線形補間のプロセスを、図 2-15 に示します。

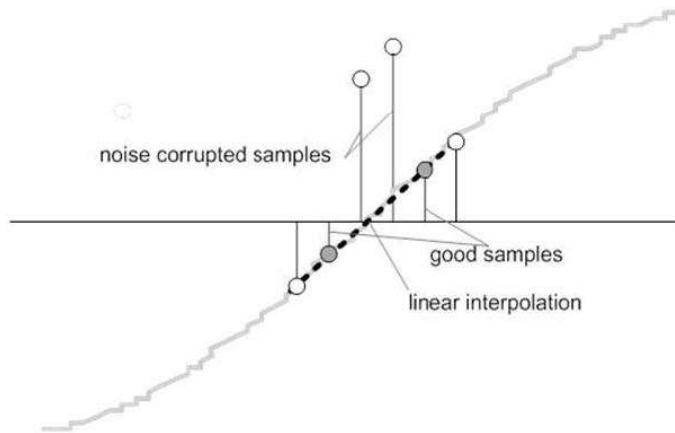


図 2-15. 周波数の測定

ノイズのスパイクは誤差を引き起こす可能性があるため、アプリケーションは変化率チェックを使用して、発生する可能性のある誤った信号を除去し、真正のゼロクロス ポイントから 2 つのポイントが必ず補間されていることを保証します。たとえば、2 つの負のサンプルを使用すると、ノイズのスパイクによって片方のサンプルが正になって負と正のペアになり、そこにゼロクロスが発生しているように見えることがあります。

結果として生じるサイクル間タイミングは、弱いローパス フィルタに通され、サイクル間の変動がさらに平滑化されます。このフィルタ処理により、安定した高精度の周波数測定が可能になり、ノイズ耐性も向上します。

2.3.2.3.2 LED パルスの生成

電気メータにおいて、負荷のエネルギー消費量は一般にキロワット時 (kWh) パルスの分数で測定されます。この情報を使用して、メータを正確にキャリブレーションし、高精度の測定を行うことができます。通常、測定素子 (MSP432 マイコン) は、消費されるエネルギーに比例するパルスを生成します。これら両方のタスクを効率的に実行するには、正確にパルスを生成し、ジッタを少なくする必要があります。時間ジッタは精度の低いことを示すものではありませんが、時間ジッタはメータの総合的な精度の負を示します。この精度の負を示すことから、ジッタを平均化する必要があります。

このアプリケーションは、平均電力を使用して、これらのエネルギー パルスを生成します。**DRDY** ポート ISR 割り込みが発生するたびに平均電力が累算され、前の 1 秒のタイムフレームで累算されたエネルギーが、現在の 1 秒のタイムフレーム内で発生した各割り込みに対して均等に拡散されます。この累算プロセスは、電力をエネルギーに変換するのと同等です。累算エネルギーがスレッショルドを超えると、パルスが生成されます。このスレッショルドを超えるエネルギーの量が保存され、次の割り込みサイクルで、スレッショルドの上に新しいエネルギー値が加算されます。平均電力は安定した値になる傾向があるため、この方法でエネルギー パルスを生成すると非常に安定し、ジッタは発生しません。

このスレッショルドは、メータの製造元によって指定されたエネルギー ティックを決定し、一定値です。このティックは通常、 1kWh あたりのパルス数、または単に kWh 単位で定義されます。エネルギー ティックごとに 1 つのパルスを生成する必要があります。たとえば、このアプリケーションでは、有効および無効エネルギーについて、kWh ごとに生成されるパルス

数を 6400 に設定します。この場合のエネルギー ティックは 1kWh/6400 です。エネルギー パルスが生成され、ヘッダーと、基板上の発光ダイオード (LED) で利用できます。パルスの生成には GPIO ピンが使用されます。

このリファレンス デザインで、[Active] というラベルの付いた LED は、相合計の有効エネルギー消費量に対応しています。[Reactive] は、2 相で累算された無効エネルギーの合計に対応します。

パルス生成のフロー図を、図 2-16 に示します。

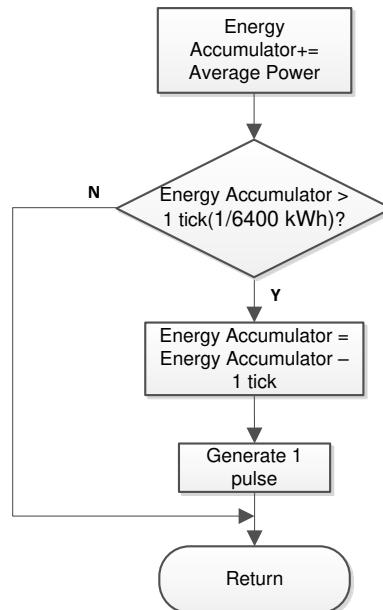


図 2-16. エネルギー表示用のパルス生成

平均電力は 0.001W 単位で、1kWh のスレッショルドは次のように定義されます。

$$1\text{kWh} \text{スレッショルド} = 1/0.001 \times 1\text{kW} \times (1 \text{秒あたりの割り込み数}) \times (1 \text{時間あたりの秒数}) = 1000000 \times 8000 \times 3600 = 0 \times 1A3185C50000$$

2.3.2.3.3 位相補償

電流トランジス (CT) をセンサとして使用すると、それによって電流信号に追加の位相シフトが発生します。また、電圧および電流入力回路の受動部品によって、別の位相シフトが発生することもあります。正確な測定を行うには、電圧サンプルと電流サンプルの間の相対的な位相シフトを補償する必要があります。位相シフト補償は、整数部と分数部に分けて実装されます。整数部は、N サンプル遅延によって行われます。分数部は、1 タップの有限インパルス応答 (FIR) フィルタを使用して 2 つのサンプルの間を補間することで行われます。これは、無効エネルギーの測定で FIR フィルタを使用して 90°シフトされた電圧サンプルを供給するのと同様の操作です。テスト ソフトウェアで、分数遅延の生成に使用されるフィルタ係数は、ルックアップ テーブルに示されています。このルックアップ テーブルには、最小でサンプルの 1/256 の分数位相シフトが示されています。このアプリケーションで使用されるサンプル レートは 8000Hz で、これは 50Hz で 0.0088° の分解能に対応します。ルックアップ テーブルには、フィルタ係数のほかに、フィルタ係数の各セットに対応するゲイン変数も示されています。このゲイン変数を使用すると、特定のフィルタ係数セットを使用して得られたゲインを除去できます。

この設計で使用されるソフトウェア位相補償の代わりに、ADS131M04 デバイスの位相補償機能を使用することもできます。このハードウェア位相補償方式を使用する場合、フィルタ係数は必要ないため、フィルタ係数のゲインで除算する必要はありません。

3 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、テスト結果

3.1 必要なハードウェアとソフトウェア

3.1.1 注意および警告

大電流が流れると、端子ブロックが熱くなる可能性があります。また、位相電圧は基板に供給されるため、適切な予防措置を講じてください。

警告



表面が高温になります。触るとやけどの原因になることがあります。触れないでください。操作時には適切な予防措置を講じてください。

注意



高電圧基板を通電中の配線に接続すると、感電の危険性があります。基板は専門家が慎重に取り扱う必要があります。安全のため、過電圧 / 過電流保護機能を備え、絶縁された試験装置の使用を強くお勧めします。

3.1.2 ハードウェア

以下のリファレンス デザインの図がハードウェアを最もよく説明しています: 図 3-1 はエネルギー測定システムの上面図で、図 3-2 は機能に基づいてリファレンス デザインのさまざまな部品の場所を示します。

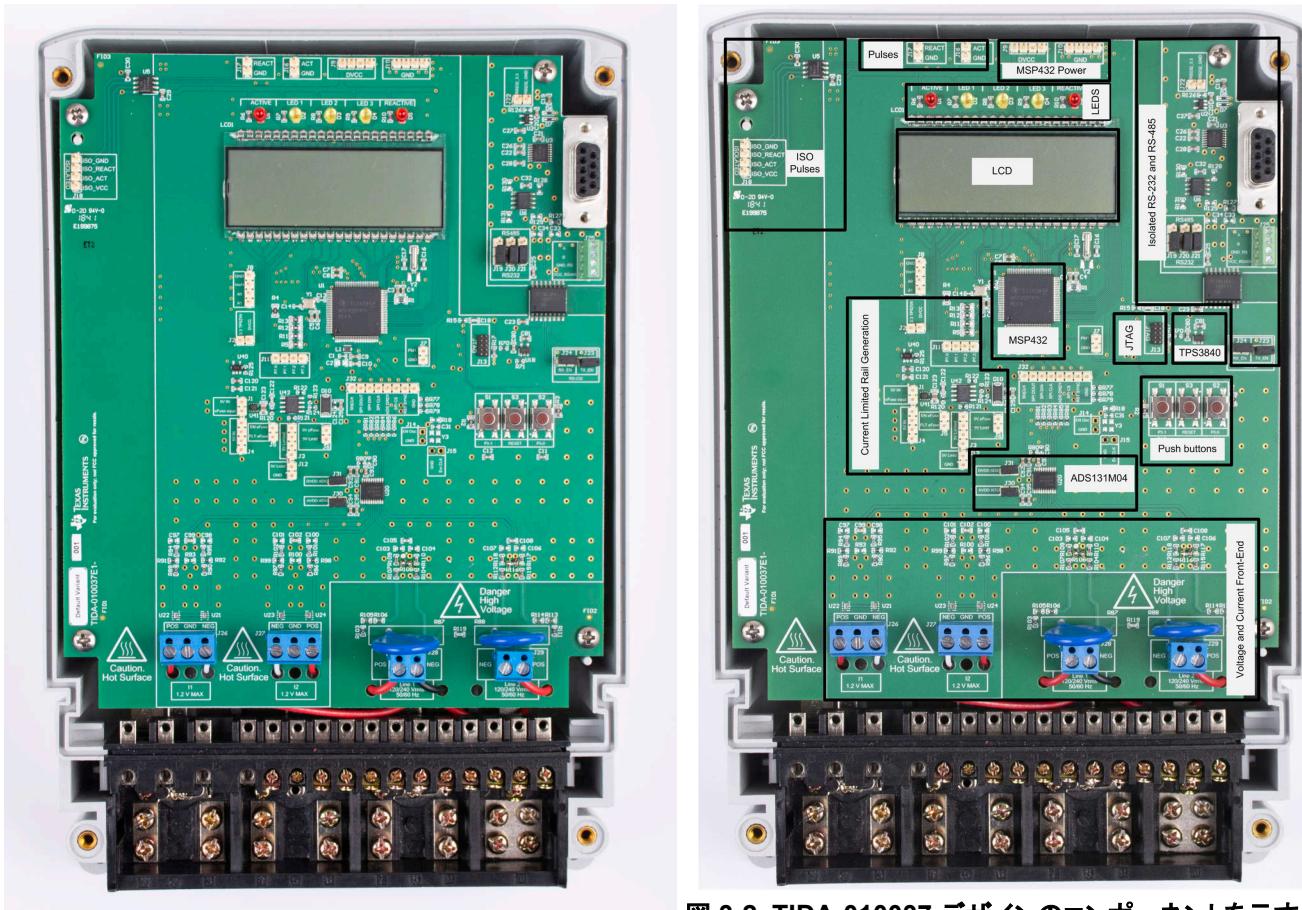


図 3-2. TIDA-010037 デザインのコンポーネントを示す上面図

図 3-1. TIDA-010037 デザインの上面図

このデザインは、2 電圧と単一電圧の構成をサポートしています。ハードウェア接続は、これら 2 つの構成のどちらを選択するかによって異なります。

3.1.2.1 テスト構成への接続

3.1.2.1.2 電圧接続

AC 電圧および電流を基板に印加して、次のポイントをテストできます。

- 端子ブロック「J28」は、位相 A のライン電圧接続に対応しています。この端子ブロックは 2 極タイプで、位相 A のライン電圧とニュートラルの両方を接続するための端子が設けられています。左側の端子ブロック位置は「POS」とラベルされており、ここで位相 A の回線接続が行われます。右側の端子ブロックの位置は「NEG」とラベルされており、ここでニュートラル接続が行われます。この端子ブロック カバーのニュートラル接続は、「J29」のニュートラル接続と短絡しているため、中性線はこれら 2 つの位置のいずれかに接続する必要があります。位相線と中性線の順序は、J29 の順序と比較して、ここでは反転していることに注意してください。
- 端子ブロック「J29」は、位相 B のライン電圧接続に対応しています。この端子ブロックは 2 極タイプで、位相 B のライン電圧とニュートラルの両方を接続するための端子が設けられています。右側の端子ブロックの位置は「POS」で、位相 A の回線接続が行われます。左側の端子ブロック位置には「NEG」というラベルがあり、ここで中性線接続が行われます。この端子ブロック カバーのニュートラル接続は、「J28」のニュートラル接続と短絡しているため、中性線はこれら

2つの位置のいずれかに接続する必要があります。位相ライン入力と中性点の順序は、J28 の順序と比較して、ここでは反転していることに注意してください。

- 端子ブロック「J26」は位相 A のセンサ後の電流入力に対応します。この端子ブロックは 3 つの位置がある端子ブロックですが、左端と右端の位置のみが使用されます。GND に接続されている中心の位置は、CT に接続されません。一番左に位置する「POS」と表示された端子ブロックには、CT の正極端子を接続します。一番右側の端子ブロックの位置は「NEG」とラベル付けされており、CT の負端子を接続する必要があります。CT の入力に印加される電流は、電流が 100A を超えないよう選択します。さらに、テストを実行する前に、この端子ブロックが CT の両方の出力リードに安全に接続されていることを確認します。ここでは、CT 誘導の順序が「J27」の順序と比較して逆になっていることに注意してください。
- 端子ブロック「J27」は位相 B のセンサ後の電流入力に対応します。この端子ブロックは 3 つの位置がある端子ブロックですが、左端と右端の位置のみが使用されます。GND に接続されている中心の位置は、CT に接続されません。最も右側に位置し、「POS」と表示されている端子には、CT の正極端子を接続します。一番左側の端子ブロックの位置は「NEG」とラベル付けされており、CT の負端子を接続する必要があります。CT の入力に印加される電流は、電流が 100A を超えないよう選択します。さらに、テストを実行する前に、この端子ブロックが CT の両方の出力リードに安全に接続されていることを確認します。ここでは、CT 誘導の順序が「J26」の順序と比較して逆になっていることに注意してください。

リファレンス デザインが 2 電圧構成で正常に機能するために必要な、各種のテスト設定用の接続を、図 3-3 と図 3-4 に示します。

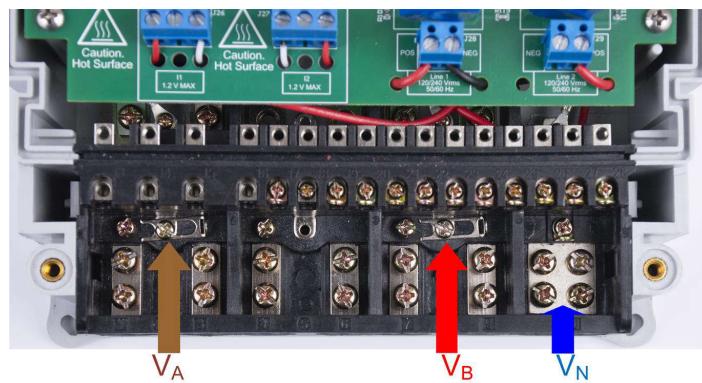


図 3-3. テスト設定の接続を含むリファレンス デザインの上面図、2 電圧構成

正面図からの接続を、図 3-4 に示します。 V_A と V_B は、位相 A 相と位相 B のラインに対応します。 V_N は、テスト AC ソースからの中性電圧に対応します。 I_{A+} と I_{A-} は位相 A の電流入力に対応し、 I_{B+} 、 I_{B-} は位相 B の電流入力に対応します。



図 3-4. テスト設定の接続を含むリファレンス デザインの正面図、2 電圧構成

3.1.2.1.2 単一電圧接続

AC 電圧および電流を基板に印加して、次のポイントをテストできます。

- 端子ブロック「J28」はライン電圧接続に対応します。この端子ブロックは、ライン A とライン B の接続がある 2 ポジション端子ブロックです。左側の端子ブロックの位置は、「POS」とラベル付けされており、ここでライン A が接続されています。右側の端子ブロックの位置は「NEG」と表示され、ここでライン B が接続されています。
- 端子ブロック「J29」をこの単一電圧構成に使用する必要はありません。
- 端子ブロック「J26」は、ライン A のセンサ後の電流入力に対応します。この端子ブロックは 3 位置ですが、左端と右端の位置のみが使用されます。GND に接続されている中心の位置は、CT に接続されません。CT の正極端子を、最も左側にある「POS」と表示された端子ブロックの位置に接続します。CT の負の端子を、最も右側にある「NEG」と表示された端子ブロックの位置に接続します。CT の入力に印加される電流は、電流が 100A を超えないよう選択します。さらに、テストを実行する前に、この端子ブロックが CT の両方の出力リードに安全に接続されていることを確認します。ここでは、CT 誘導の順序が「J27」の順序と比較して逆になっていることに注意してください。
- 端子ブロック「J27」は、ライン A のセンサ後の電流入力に対応します。この端子ブロックは 3 位置ですが、左端と右端の位置のみが使用されます。GND に接続されている中心の位置は、CT に接続されません。最も右側に位置し、「POS」と表示されている端子には、CT の正極端子を接続します。CT のマイナス端子を、一番左側の端子ブロック位置（「NEG」というラベル）に接続します。CT の入力に印加される電流は、電流が 100A を超えないよう選択します。さらに、テストを実行する前に、この端子ブロックが CT の両方の出力リードに安全に接続されていることを確認します。ここでは、CT 誘導の順序が「J26」の順序と比較して逆になっていることに注意してください。

リファレンス デザインが単一電圧構成で正常に機能するために必要な、各種のテスト設定用の接続を、図 3-5 と図 3-6 に示します。



図 3-5. テスト設定の接続を含むリファレンス デザインの上面図、単一電圧構成

正面図からの接続を、図 3-6 に示します。V_A および V_B はライン A およびライン B に対応しています。I_{A+} および I_{A-} はライン A の電流入力に対応し、I_{B+} および I_{B-} はライン B の電流入力に対応します。



図 3-6. テスト設定の接続を含むリファレンス デザインの正面図、単一電圧構成

3.1.2.2 電源オプションとジャンパ設定

この設計における MSP432 MCU および ADS131M04 部分は、2 つの方法のいずれかで単一の電圧レール (DVCC) から電源供給されます。最初の方法では、3.3 V の外部電源を DVCC ヘッダ J9 と GND に接続することで、DVCC に直接給電できます。DVCC を直接駆動するこの方法に対応するため、ジャンパ ヘッダ J2 にジャンパを配置しないでください。

2 つ目の DVCC 駆動方法では、TPS70933 LDO の 3.3V 出力から DVCC 電圧を生成します。この 2 つ目の方法では、ジャンパ ヘッダ J2 にジャンパを取り付け、J4 と GND 間に 5V を印加して、TPS70933 に必要な入力電圧を供給します。J1 と J2 の両方にジャンパを取り付けた場合、ヘッダ J4 に印加された 5V レールが DVCC と、TPS25921L によって生成される電流制限付きレールの両方に電源を供給します。

各種のジャンパ ヘッダーとジャンパ設定が存在するため、基板を柔軟に設計できます。これらのヘッダーの一部は、基板が正しく機能するようにジャンパを適切に配置する必要があります。基板の各ジャンパの機能を、表 3-1 に示します。

注

主な機能の列に (警告) というテキストがあるヘッダは絶縁されていないため、商用電源で動作させるときは、そこで測定機器を使用しないでください (特に単一電圧構成では、システム グランドがライン電圧に接続されています)。この注意は、以下の場合には適用されません。このデザインの基板の外部にあるアイソレータを使用してヘッダーに接続する場合、機器がバッテリで動作し、商用電源に接続していない場合、または AC 商用電源が絶縁されている場合。

表 3-1. ヘッダ名とジャンパ設定

ヘッダーまたはヘッダーのオプション名	タイプ	主な機能	有効な使用事例	備考
J1	2 ピンのジャンパ ヘッダー	TPS25921L 入力電圧の選択 (警告)	このヘッダにジャンパを取り付けることで、J4 ヘッダに印加された電圧を TPS25921L の入力電圧として使用できます。この入力電圧の電流制限版が、TPS25921L の出力として供給されます。J4 に印加されている電圧とは異なる電圧を使用する場合は、このヘッダに外部電圧を印加し、ここにはジャンパを取り付けないでください。	J1 と J2 の両方にジャンパを取り付けた場合、TPS25921L の入力電圧と DVCC は同じソース(ヘッダ J4)から供給されるため、外部電源は 1 つだけですみます。DVCC と TPS25921L に別々の電源を使用する場合は、J1 のジャンパを取り外し、目的の TPS25921L 用電圧を J1 ヘッダのピン 2 に直接印加します。または、J1 のジャンパを外す代わりに J2 のジャンパを外し、J4 ヘッダの電圧や TPS70933 LDO を使用して DVCC 用の 3.3V レールを生成する代わりに、3.3V を DVCC ヘッダに直接印加することもできます。
J2	2 ピンのジャンパ ヘッダー	TPS70933 DVCC 出力選択 (警告)	このヘッダにジャンパを取り付けることで、J4 に印加された電圧と TPS70933 LDO を使用して DVCC 用の 3.3V レールを生成します。TPS70933 を使用せずにバイパスする場合は、3.3V を直接 DVCC ヘッダ J9 に印加し、ここにはジャンパを取り付けません。	J1 と J2 の両方にジャンパを取り付けた場合、TPS25921L の入力電圧と DVCC は同じソース(ヘッダ J4)から供給されるため、外部電源は 1 つだけですみます。DVCC と TPS25921L に別々の電源を使用する場合は、J1 のジャンパを取り外し、目的の TPS25921L 用電圧を J1 ヘッダのピン 2 に直接印加します。または、J1 のジャンパを外す代わりに J2 のジャンパを外し、J4 ヘッダの電圧や TPS70933 LDO を使用して DVCC 用の 3.3V レールを生成する代わりに、3.3V を DVCC ヘッダに直接印加することもできます。
J3	4 ピン ヘッダー	電流制限、5V レール (警告)	電流を制限したい無線機や無線モジュールを、このヘッダと GND に接続します。	J1 にジャンパを取り付けた場合、これはヘッダ J4 に印加された電圧の電流制限付きバージョンになります。この電流制限された電圧は、ヘッダ J12 のピン 1 にも現れます。
J4	4 ピン ヘッダー	5V 入力 (警告)	ここに GND 間に 5V を印加すると、J3 に 5V の電流制限付き出力が生成され、さらに DVCC に接続可能な 3.3V 出力も生成されます。	J4 から J3 の電流制限出力を生成するには、J1 にジャンパを配置します。J4 から DVCC に 3.3V を生成するには、J2 にジャンパを配置します。
J5	2 ピン ヘッダー	TPS25921 FLTb および EN/UVLO ピンに接続されたヘッダ (警告)	このヘッダのピン 2 にプローブを当てて、TPS25921L がファルトフラグをアサートしているかどうかを確認します。ピン 1 で TPS25921L の EN/UVLO ピンの状態を調べます。	TPS25921L のサーマル シャットダウンが発生すると、TPS25921L の out ピンに接続された負荷は、VIN ピンに接続された電源から切り離されます。その結果、ヘッダ J3 は、J4 に印加された電圧の電流制限付きバージョンではありません。マイコンは EN/UVLO を Low に駆動することで、TPS25921L デバイスの入力ピン側の電源を出力ピン側の負荷に再接続しようすることができます。テストソフトウェアでは、サーマル シャットダウン イベントの後、最大 1 回リトライが行われます。
J6	2 ピンのジャンパ ヘッダー	TPS25921L 出力接続 (警告)	ここにジャンパを取り付けることで、TPS25921L の out ピンをヘッダ J3 に接続し、TPS2591L デバイスの VIN ピンに印加された電圧の電流制限付きバージョンを生成します。	ここにジャンパを配置します。

表 3-1. ヘッダーネームとジャンパ設定 (続き)

ヘッダーまたはヘッダーのオプション名	タイプ	主な機能	有効な使用事例	備考
J7	2ピン ヘッダー	THVD1500 RE および DE ピン (警告)	このヘッダーにプローブを当てることで、THVD1500 デバイスの RE および DE ピンに入力される信号を確認できます。この信号によって、レシーバまたはドライバの有効と無効が決まります。	このヘッダーには GND と PM1。ここで PM1 は MSP432 MCU の P2.7 GPIO ピンであり、THVD1500 デバイスの RE および DE ピンを駆動します。
J8	4ピン ヘッダー	MSP432 ADC14 通信ヘッダー (警告)	このヘッダーにプローブを接続すると、ADC チャネル A0 および A1、さらに ADC14 のリファレンス入力に信号を入力できます。	テストソフトウェアでは、このヘッダーを使用しません。このヘッダーは、MSP432 MCU の 14 ビット SAR ADC を使用してカスタム検出コードを追加したい場合に備えて設けられています。
J9	4ピン ヘッダー	DVCC 電圧ヘッダー (警告)	ここにプローブを当てて、DVCC 電圧を測定します。TPS70933 LDO を使用する代わりに、DVCC 経由で外部から基板に直接電力を供給する場合は、ベンチまたは外部電源の正端子を接続します。	DVCC が TPS70933 LDO から給電されている場合(ヘッダー J2 にジャンパを取り付けられている場合)、ここから J10 間にプローブを接続して、TPS70933 の出力電圧を測定します。DVCC を外部から直接給電する場合(ヘッダー J2 のジャンパを取り外す場合)、ここ J10 の間に 3.3V を印加する必要があります。
J10	4ピン ヘッダー	グランド電圧ヘッダー (警告)	ここにプローブを当てて、GND 電圧を測定します。TPS70933 LDO を使用せずに DVCC から直接外部電源でボードに給電する場合は、ベンチ電源または外部電源の負極端子をここに接続します。	DVCC が TPS70933 LDO から給電されている場合(ヘッダー J2 にジャンパを取り付けられている場合)、ここから J9 間にプローブを接続して、TPS70933 の出力電圧を測定します。DVCC を外部から直接給電する場合(ヘッダー J2 のジャンパを取り外す場合)、3.3V を J9 とのヘッダーの間に印加する必要があります。
J11	4ピン ヘッダー	MSP432 P7.0、7.1、P7.2、P7.3 ピンを含むヘッダー (警告)	ここにプローブを接続して、P7.0、P7.1、P7.2、および P7.3 の各 GPIO ピンを測定します。	P7.0、P7.1、および P7.2 ピンは、LCD のコントラストを調整するために使用されます。この設計では P7.3 を使用していません。これらのピンはすべてポートマッピングが可能です。LCD が不要な場合は、ソフトウェアで無効化でき、さらに R5、R11、R12、および R13 を取り外すことで、P7.0、P7.1、P7.2 をポートマッピングして、外部無線機や無線モジュールとの通信など、他の用途に使用できます。これらのピンを外部無線機や無線モジュールとの通信に使用する場合、ヘッダー J12 を使用してそれらの外部モジュールに電源を供給し、同時に電流を制限できます。これにより、外部で短絡が発生しても計測回路への電源供給に影響を与えません。
J12	2ピン ヘッダー	電流制限レール (警告)	このヘッダーを外部モジュールに接続すると、電流制限付きの 5V レールを外部モジュールに供給できます。	このヘッダのピン 1 は、TPS25921L からの電流制限付き出力レールであり、ヘッダー J3 からも利用できます。このヘッダのピン 2 は GND 接続です。ここに 5V の電流制限付き電圧を出力させるには、ヘッダー J4 に 5V を印加し、J1 と J6 にジャンパを取り付けます。
J13	10ピン、2行のコネクタ	JTAG:MSP432 プログラミングヘッダー (警告)	MSP432 MCU に電源を供給するには、このコネクタに MSP-FET-432ADPTR アダプタの一方のコネクタは FET ツールに接続し、もう一方のコネクタは MSP432 MCU の JTAG コネクタに接続します。MSP432 MCU をプログラムするには、MSP432 に外部電源を供給する必要がある点に注意してください。このヘッダー FET ツールは絶縁されていないため、商用電源(メイン電源)を使用しており、その電源が絶縁されていない場合には、このヘッダーに接続しないでください。	MSP-FET-432ADPTR を使用すると、MSP-FET ツールで MSP432 デバイスをプログラムできます。MSP-FET-432ADPTR アダプタの一方のコネクタは FET ツールに接続し、もう一方のコネクタは MSP432 MCU の JTAG コネクタに接続します。MSP432 MCU をプログラムするには、MSP432 に外部電源を供給する必要がある点に注意してください。このヘッダー FET ツールは絶縁されていないため、商用電源(メイン電源)を使用しており、その電源が絶縁されていない場合には、このヘッダーに接続しないでください。
J16	2ピン ヘッダー	有効エネルギー パルス (警告)	ここで、累積有効エネルギー パルスを調べます。このヘッダーには GND と ACT。ここは実際に有効電力量パルスが出力される箇所です。	このヘッダは AC メイン電源から絶縁されていないため、ここに測定機器を接続しないでください(特に単一電圧構成の場合)。代わりに、絶縁されている J18 の「ISO_ACT」ピンを使用します。有効電力量パルスを試験する場合は、絶縁されているため、J18 の「ISO_ACT」ピンを使用します。
J17	2ピン ヘッダー	無効エネルギー パルス (警告)	ここで、累積無効エネルギー パルスを調べます。このヘッダーには GND と REACT のピンがあり、無効電力量パルスはここから実際に出力されます。	このヘッダは AC メイン電源から絶縁されていないため、ここに測定機器を接続しないでください(特に単一電圧構成の場合)。無効電力量パルスを試験する場合は、絶縁されているため、J18 の「ISO_REACT」ピンを使用してください。
J18	4ピン ヘッダー	絶縁型パルス ヘッダー	ここで、絶縁型の累積有効エネルギー パルスと、絶縁型の累積 3 相無効エネルギー パルスを調べます。これらのヘッダーをパルス出力に使用することができ推奨されます。特に単一電圧構成の場合、この構成ではシステムが電圧ラインの一方を基準として動作するためです。	このヘッダーには ISO_GND、ISO_VCC、ISO_GND は、エネルギー パルスの絶縁グランドです。ISO_VCC は、絶縁された有効電力および無効電力パルス用の VCC 接続です。ISO_ACT は、絶縁された有効電力量パルスが出力される端子です。ISO_REACT は、絶縁された無効電力量パルスがに出力される端子です。このヘッダは AC 商用電源から絶縁されており、AINレーダーが既に存在するため、スコープや他の測定機器と安全に接続できます。このヘッダで有効電力量パルスおよび無効電力量パルスを出力するには、ISO_GND と ISO_VCC 間に 3.3V または 5V を印加する必要があります。生成されるパルスの論理 High 電圧は、ISO_GND と ISO_VCC 間に印加された電圧と同じ値になります。
J19	3ピンのジャンパ ヘッダー	RS-232 または RS-485 選択用電源	RS-232 または RS-485 のいずれの通信方式を使用するかに応じて、対応する位置にジャンパを取り付けます。	RS-232 通信を選択する場合は、このヘッダ、J20、および J21 の RS-232 位置にジャンパを取り付けます。RS-485 通信を選択する場合は、このヘッダ、J20、および J21 の RS-485 位置にジャンパを取り付けます。
J20	3ピンのジャンパ ヘッダー TX	RS-232 または RS-485 選択用 TX	RS-232 または RS-485 のいずれの通信方式を使用するかに応じて、対応する位置にジャンパを取り付けます。	RS-232 通信を選択する場合は、このヘッダ、J19、および J21 の RS-232 位置にジャンパを取り付けます。RS-485 通信を選択する場合は、このヘッダ、J19、および J21 の RS-485 位置にジャンパを取り付けます。
J21	3ピンのジャンパ ヘッダー RX	RS-232 または RS-485 選択用 RX	RS-232 または RS-485 のいずれの通信方式を使用するかに応じて、対応する位置にジャンパを取り付けます。	RS-232 通信を選択する場合は、このヘッダ、J19、および J20 の RS-232 位置にジャンパを取り付けます。RS-485 通信を選択する場合は、このヘッダ、J19、および J20 の RS-485 位置にジャンパを取り付けます。
J22	2ピン ヘッダー	RS232_3.3 (RS-232 ラインから取得された電圧源) と RS232_GND (絶縁された RS-232 用のグラウンド接続) を含むヘッダー	ここにプローブを当てて、RS-232 側の絶縁パリア内で生成された絶縁 3.3V 電源を測定します。	ここで生成される 3.3V レールは、PC の RS-232 ポートから供給される電圧を利用しているため、RS-485 モードでは使用できません。RS-485 モードを使用する場合は、THVD1500 RS-485 トランシーバに電力を供給するため、外部電源を接続する必要があります。
J23	2ピンのジャンパ ヘッダー	TX_EN:RS-232 送信イネーブル (警告)	RS-232 送信を有効にするには、ここにジャンパを取り付けます。	

表 3-1. ヘッダーネームとジャンパ設定 (続き)

ヘッダーまたはヘッダーのオプション名	タイプ	主な機能	有効な使用事例	備考
J24	2 ピンのジャンパ ヘッダー (警告)	RX_EN:RS-232 受信イネーブル (警告)	ここにジャンパを取り付けると、RS-232 を使用して文字を受信できるようになります。	
J25	4 ピンの端子ブロック	RS-485 接続	RS-485 の接続ポイント	RS-485 を使用して GUI を表示するには、ここで USB を RS-485 アダプタに接続します。このヘッダーのピン 1 に 5V を外部から供給する必要があります。このヘッダーのピン 2 は RS-485 のグランド、ピン 3 は B バスの I/O ライン、ピン 4 は A バスの I/O ラインです。
J26	3 ピンの端子ブロック	位相 A (2 電圧構成) またはライン A (単一電圧構成) CT 接続 (警告)	ライン A センサ後の電流入力	この端子ブロックは 3 位置ですが、左端と右端の位置のみが使用されます。GND に接続されている中心の位置は、CT に接続されません。CT の正極端子を、最も左側にある「POS」と表示された端子ブロックの位置に接続します。CT の負の端子を、最も右側にある「NEG」と表示された端子ブロックの位置に接続します。テストを実行する前に、この端子ブロックが CT の両方の出力端子と安全に接続されていることを確認してください。ここでは、CT リード線の接続順が J27 の順序とは逆になっていることに注意してください。
J27	3 ピンの端子ブロック	位相 B (2 電圧構成) またはライン B (単一電圧構成) CT 接続 (警告)	ライン B のセンサ後の電流入力	この端子ブロックは 3 位置ですが、左端と右端の位置のみが使用されます。GND に接続されている中心の位置は、CT に接続されません。CT の正の端子を、右端の端子ブロックの位置 (POS) に接続します。CT のマイナス端子を、一番左側の端子ブロック位置 (NEG) に接続します。テストを実行する前に、この端子ブロックが CT の両方の出力端子と安全に接続されていることを確認してください。ここでは、CT リード線の接続順が J26 の順序とは逆になっていることに注意してください。
J28	2 ピンの端子ブロック	位相 A の電圧 (警告)	位相 A のライン接続	2 電圧構成の場合、この端子ブロックはリファレンス デザインのケースでは、ワイヤを使用して、中性電圧と位相 A のライン電圧接続に接続されます。単一電圧構成では、この端子ブロックは中性線ではなくライン B に接続されます。PCB シルクスクリーンの「NEG」で示される端子ブロックのピンを、ニュートラル (2 電圧構成) またはライン B (1 電圧構成) に接続します。PCB シルクスクリーンで「POS」で示される端子ブロックのピンは、位相 A ラインへの接続です。J28 と J29 の中性線接続は、PCB 上ではすべて互いに接続されています。これは位相 A のライン電圧の接続であるため、商用電源電圧を測定できる機器を使用している場合のみ、ここでプローブを付けます。ここでは、相入力と中性線の接続順が J29 の順序とは逆になっていることに注意してください。
J29	2 ピンの端子ブロック	位相 B 電圧 (警告)	位相 B ライン接続	2 電圧構成の場合、この端子ブロックはリファレンス デザインのケースでは、ワイヤを使用して、中性電圧と位相 B のライン電圧接続に接続されます。単一電圧構成では、この端子ブロックは使用されません。PCB シルクスクリーンの「NEG」で示される端子ブロックのピンをニュートラルに接続します。PCB シルクスクリーンの「POS」で示された端子ブロックのピンを位相 B ラインに接続します。J28 と J29 の中性線接続はすべて、PCB 上で互いに接続されています。これは位相 B のライン電圧の接続であるため、商用電源電圧を測定できる機器を使用している場合のみ、ここでプローブを当てます。ここでは、相入力と中性線の接続順が J28 の順序とは逆になっていることに注意してください。また、この端子ブロックは単一電圧構成には使用されません。
J30	2 ピンのジャンパ ヘッダー	ADS131M04 AVDD ジャンパ (警告)	ADS131M04 を正しく動作させるためには、このジャンパ ヘッダーにジャンパまたは電流計を介した短絡が必要です。	このヘッダと J31 を使用すると、ADS131M04 の消費電流を測定できます。
J31	2 ピンのジャンパ ヘッダー	ADS131M04 DVCC ジャンパ (警告)	ADS131M04 を正しく動作させるためには、このジャンパ ヘッダーにジャンパまたは電流計を介した短絡が必要です。	このヘッダと J30 を使用すると、ADS131M04 の消費電流を測定できます。
J32	8 ピン ヘッダー	ADS131M04 MSP432 通信ヘッダー (警告)	ここにプローブを接続すると、ADS131M04 デバイスのチップセレクト信号、SPI 信号、RST 信号、CLKIN 信号、および DRDY 信号にアクセスできます。	ADS131M04 デバイスの RST ピンは、ADS131M04 をリセットするために使用されます。ADS131M04 を初期化するとき、MSP432 はこのピンを駆動して ADS131M04 をリセットします。ADS131M04 デバイスの DRDY ピンは、新しい電流サンプルが利用可能であることを MSP432 MCU に通知するため使用されます。CLKIN ピンには、MSP432 MCU の SMCLK クロック出力が入力され、ADS131M04 デバイス内で分周されて使用される変調器クロックが生成されます。このヘッダは AC 商用電源から絶縁されていないため、リファレンス デザインの外部にあるアイソレータを使用する場合を除き、商用電源で動作するときは測定機器を接続しないでください。このヘッダーのピンマッピングは次のとおりです。 <ul style="list-style-type: none"> • ピン 1: SMCLK (ADS131M04 CLKIN ピン) • ピン 2: SPI DOUT (ADS131M04 DIN ピン / SIMO) • ピン 3: SPI DIN (ADS131M04 DOUT/ ピン) SOMI • ピン 4: SPI CLK (ADS131M04 SCLK ピン) • ピン 5: ADS DRDY (ADS131M04 DRDY ピン) • ピン 6: SPI CS (ADS131M04 CS ピン) • ピン 7: RST SYNC (ADS131M04 SYNC/ RESET ピン) • GND

3.1.3 ソフトウェア

この設計の評価に使用する MSP432 ソフトウェアは、テスト用ソフトウェアです。セクション 2.3.2 は、計測テスト用のカスタム ソフトウェアを実装する方法を理解できるよう、テスト用ソフトウェアの機能について説明します。

3.2 テストと結果

3.2.1 テスト設定

3.2.1.1 SVS と eFuse の機能テスト

電力量測定の精度試験に加えて、TPS3840 SVS デバイスおよび TPS25921L eFuse デバイスの機能試験も実施されます。TPS3840 の試験では、外部電源を DVCC に直接接続してボードに給電します (DVCC に直接電源を供給するため、J2 にジャンパを取り付けてはいけません)。その後、電源の出力電圧を 3.3V から 1.9V までゆっくりと変化させ、TPS3840 デバイスによって MSP432 MCU がリセットされる電圧、すなわち負の電圧スレッショルドを記録します。負の電圧スレッショルドに達した後、電源出力電圧は 1.9V から 3.3V にゆっくりと上昇します。リセットが解放される電圧は、負の電圧スレッショルドにヒステリシス電圧を加算した値と等しく、これも同様にログに記録されます。

TPS25921L デバイスの試験では、J2 にジャンパを取り付け、TPS70933 デバイスを介して MSP432 MCU に電源を供給します。J1 にジャンパを取り付けることで、TPS70933 はヘッダ J4 に印加された 5V レールから給電されます。J1 および J2 に加えて、J6 にもジャンパを取り付け、TPS25921L の出力をヘッダ J12 に接続します。外部電源の正極端子を J4 に、負極端子を GND に接続します。また、TPS25921L の OUT ピンの出力電圧を測定するために、マルチメータをヘッダ J12 に接続します。最初のテストでは、外部電源出力を 5V から 4V まで徐々に変化させて、低電圧誤動作防止スレッショルドを測定します。低電圧スレッショルドに達する前に、TPS25921L OUT ピンの電圧を外部電源から供給される電圧と等しくします。低電圧スレッショルドに達すると、OUT ピンが IN ピンから切離され、外部電源電圧ではなく出力電圧が 0V になります。低電圧スレッショルドに達した後、電源電圧をゆっくりと 5V まで戻します。TPS25921L の OUT ピンが IN ピンに再接続される電源電圧を記録します。このとき、OUT ピンの電圧が 0V ではなく外部電源電圧と等しくなることで、再接続されたことが確認できます。

低電圧スレッショルドのテストに加えて、過電圧スレッショルドもテストされます。過電圧スレッショルド試験は、電源電圧を 5V から 6V に上昇させ、TPS25921L デバイスの OUT ピンが IN ピンから切り離される電圧を記録することで行います。過電圧スレッショルドを確認した後、電源電圧を 5V に向けて徐々に下げ、TPS25921L デバイスの OUT ピンが IN ピンに再接続される外部電源電圧を測定します。

TPS25921L の電流制限機能を試験する際は低電圧試験および過電圧試験とほぼ同じ構成を使用しますが、ヘッダ J12 にはマルチメータの代わりに Chroma 製 DC 電子負荷を接続します。サーマル シャットダウン機能は、TPS25921L デバイスの OUT ピンに接続されている負荷の消費電流を増やし、TPS25921L デバイスの IN ピンに印加される電圧から、負荷が切り離される電流を測定することで、電流制限をテストしています。サーマル シャットダウンに達した後、負荷電流はより低い値に設定され、TPS25921L の ENUV ピンにパルスを供給するようにソフトウェアが変更され、OUT ピンが外部電源に再接続されていることを確認できます。

3.2.1.2 電気メータの計測精度のテスト

電気メータの構成で計測精度をテストするには、ソース ジェネレータを使用して、「セクション 3.1.2.1」に記載されている適切な場所でシステムに電圧と電流を供給します。この設計では、2 つの電圧構成において、各位相に対してラインと中性線間の名目電圧 120V、キャリブレーション電流 10A、および名目周波数 60Hz が使用されています。単一電圧構成では、2 つのライン電圧間の電圧は 240V で、キャリブレーション電流 10A が使用され、名目周波数は 60Hz です。

電圧と電流がシステムに印加されると、システムは累積有効エネルギー パルスと累積無効エネルギー パルスを、6400 パルス/kWh のレートで出力します。このパルス出力はリファレンス メーターに供給されます (このリファレンス デザインのテスト機器では、このパルス出力はソース ジェネレータと同じ機器に内蔵されています)。システムに供給される実際のエネルギーと、システムの有効エネルギーと無効エネルギーの出力パルスによって決定される測定エネルギーに基づいて、エネルギーの % 誤差を決定します。2 電圧構成については、セクション 3.2.1.3.2.2 で説明しているように、エネルギー ゲインのキャリブレーションと位相の補償を行った後で、累積有効エネルギーの誤差テスト、累積無効エネルギーの誤差テスト、個別相の有効エネルギーのテスト、周波数変動のテストが実行されます。エネルギーの誤差テストに加えて、2 電圧の構成についても、RMS 電圧の % 誤差と RMS 電流の % 誤差が測定されます。単一電圧の構成では、累積有効エネルギーの誤差テストと電圧変動のテストも行なわれます。単一電圧および 2 電圧のテストの両方について、電力オフセットのキャリブレーションは実施されていないことに注意してください。

累積有効エネルギー誤差、累積無効エネルギー誤差テスト、および個別相有効エネルギーテストでは、電流を 50mA から 100A まで変化させます。累積有効エネルギーおよび各位相誤差のテストでは、電圧および電流波形に 0°、60°、および -60° の位相シフトが参考設計に供給されます。有効エネルギー出力パルスからの誤差に基づき、0°、60°、-60° の位相シフトについて、有効エネルギーの % 誤差と電流とのプロットが作成されます。累積無効エネルギーの誤差テストでも同様のプロセスが行われますが、位相シフトとして 30°、60°、-30°、-60° が使用され、累積有効エネルギーの誤差ではなく累積無効エネルギーの誤差がプロットされます。累積有効エネルギーと累積無効エネルギーのテストでは、各位相のエネルギー読み取り値の合計について精度がテストされます。これに対して、個別の位相エネルギーの読み取り値(位相 A、位相 B の両方)のテストでは、各位相の有効エネルギーがテストされます。ある相の個別のエネルギー精度をテストするとき、他の相をディセーブルするために、他の相に供給される入力電流は 0A になります。これによって、累積有効エネルギーの読み取り値は、理想的には個別の相電圧と等しくなるものとし、累積エネルギー パルス出力を使用して個別の相の精度をテストできます。

電流の変化による有効エネルギーのテストに加えて、RMS 電圧を 240V~15V の範囲で変化させ、有効エネルギーの % 誤差を測定することによる有効エネルギーのテストも行われます。この電圧変動テストは、特に、累積 2 電圧有効エネルギー テスト、累積 1 電圧有効エネルギー テスト、個別相有効エネルギーのテストに対して行われました。

それ以外のエネルギー テストして、周波数変動テストも行われます。このテストでは、周波数が公称周波数 60Hz から ±2Hz の範囲で変化します。このテストは、0°、60°、-60° の位相シフトと、0.5A および 10A で行われます。これらの条件で発生する、有効エネルギーの誤差が記録されます。

RMS 精度をテストするには、エネルギー精度テストに使用されるパルス出力は、RMS 電圧および電流には使用できないため、GUI から RMS 読み取り値を使用します。電圧テストでは、各位相に 10A の電流が印加され、電圧は各位相について同時に 9V~270V の範囲で変動します。基板上に 275V のバリスタがあるので、電圧は 270V を超えません。275V を超える電圧をテストする場合、このバリスタを取り除いてもかまいません。各電圧を印加してから、測定値が安定した後で、各位相について RMS 電圧読み取り値が GUI から記録されます。測定された RMS 電圧読み取り値を GUI から取得すると、リファレンス メータから実際の RMS 電圧読み取り値が得られます。これが必要なのは、ソース ジェネレータは、特に電圧が小さい場合、電圧に対して要求される値を生成しない可能性があるためです。リファレンス メータで測定された RMS 電圧と、GUI の RMS 電圧の値から、RMS 電圧の % 誤差が計算されます。同様のプロセスを使用して、各相に 120V を使用し、電流を 50mA~100A の範囲で変化させることで、RMS 電流の % 誤差が計算されます。

通常の 8ksps サンプル レートでの有効エネルギー誤差のテストに加え、ADC サンプル レートが 32ksps のときにも有効エネルギー誤差がテストされました。この高いサンプル レートをサポートするために、計測ソフトウェアは計測パラメータを減らして計算するように変更され、これらのパラメータは 1 位相のみで計算されるようになりました。この 32ksps テストは、ADS131M04 が高いサンプル レートを使用しても高精度を実現できることを示しており、これは高調波解析や負荷の分離が必要なアプリケーションに役立ちます。

3.2.1.3 計測読み取り値の表示とキャリブレーション

このセクションでは、テストソフトウェアを使用してこの設計の結果を検証するため使用される方法について説明します。

3.2.1.3.1 LCD から結果を表示する

LCD は、2 秒ごとに計測パラメータ間をスクロールします。LCD に表示される各計測パラメータについて、通常、画面には 3 つの項目が表示されます。パラメータの位相を示すシンボル、表示されているパラメータを示すテキスト、そしてパラメータの実際の値です。LCD の上部に位相シンボルが表示され、三角形の形で示されます。シンボルの向きによって、対応する位相が決まります。[図 3-7](#) および [図 3-8](#) に三角形のさまざまな方向と位相記述子のマッピングを示します。



図 3-7. 位相 A のシンボル



図 3-8. 位相 B のシンボル

累積的な有効電力および無効電力などの集計結果や、位相に依存しないパラメータ（時刻や日付など）は、LCD 上のすべての位相記号を消去することによって示されます。

LCD の一番下の行は、表示されるパラメータの値を示すために使用されます。表示されているパラメータを示すテキストが、LCD の一番上の行に表示されます。LCD に表示される各種測定パラメータと、それらが表示される関連ユニットを、[表 3-2](#) に示します。指定列には、どの文字がどのメータパラメータに対応しているかが表示されます。

表 3-2. 表示されるパラメータ

パラメータ名	指定	単位	備考
アクティブ時の消費電力	Acpo	ワット (W)	このパラメータは、位相ごとに表示されます。集計された有効電力も表示されます。
無効電力	Repo	ボルトアンペア無効 (var)	このパラメータは、位相ごとに表示されます。集計された無効電力も表示されます。
見かけの電力	Rppo	ボルトアンペア (VA)	このパラメータは、位相ごとに表示されます。
力率	Pf	0 から 1 の間の定数	このパラメータは、位相ごとに表示されます。
電圧	Udns	ボルト (V)	このパラメータは、位相ごとに表示されます。
電流	Inds	アンペア (A)	このパラメータは、位相ごとに表示されます。
周波数	Freq	ヘルツ (Hz)	このパラメータは、位相ごとに表示されます。
消費される有効エネルギーの合計	Acen	kWh	このパラメータは、位相ごとに表示されます。
消費される合計無効エネルギー	Reen	kVarh	このパラメータは、位相ごとに表示されます。これは、第一象限（象限）および第四象限の無効エネルギーの合計を表示します。
時間	H:inE	Hour:minute:second	このパラメータは、集計された読み取り値のシーケンスが表示されている場合にのみ表示されます。このパラメータは、各位相ごとに一度だけ表示されません。
日付	date	Year:month:day	このパラメータは、集計された読み取り値が表示されている場合にのみ表示されます。このパラメータは、各位相ごとに一度だけ表示されません。

図 3-9 は、LCD に表示された位相 A の測定周波数 59.99Hz の例を示しています。

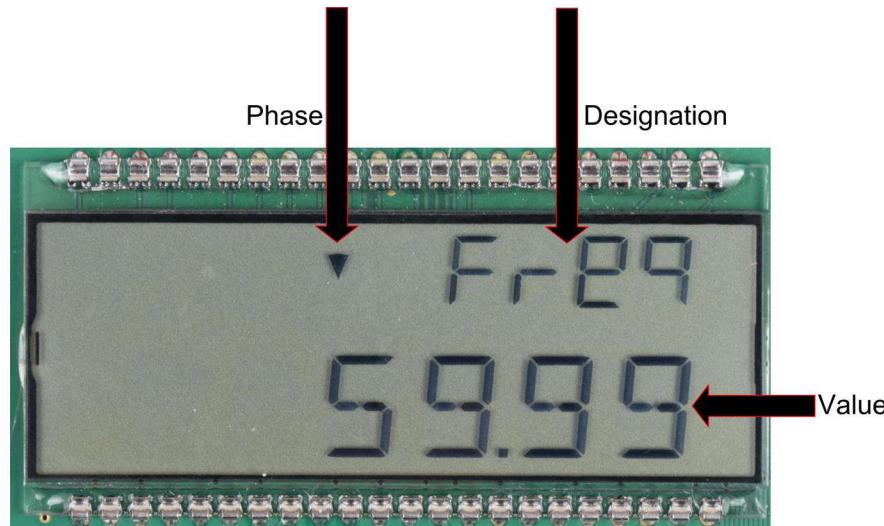


図 3-9. LCD

3.2.1.3.2 PC からのキャリブレーションと結果の表示

3.2.1.3.2.1 結果の表示

GUI から計測パラメータの値を表示するには、次の手順を実行します。

1. PC GUI との通信に RS-485 と RS-232 のどちらの接続を使用するかを選択します。この選択は、ジャンパ ヘッダ J19、J20、J21 に 3 つのジャンパを配置することで行います。RS-485 通信オプションを選択するには、これら 3 つのヘッダの上側にある 2 本のピン (ボード上では RS485 とラベル表示) にジャンパを配置します。RS-232 通信オプションを選択するには、3 つのヘッダの下部にある 2 本のピン (ボード上では RS232 とラベル表示) にジャンパを配置します。
2. リファレンス デザインを PC に接続します。
 - RS-232 を使用する場合: RS-232 ケーブルを使用して、リファレンス デザインを PC に接続します。PC に RS-232 アダプタがない場合は、シリアル RS-232 アダプタを使用できます。RS-232 アダプタは、PC に接続されると COM ポートを作成する必要があります。
 - RS-485 を使用する場合: USB から RS-485 へのアダプタを使用して、この設計で PC GUI と RS-485 ポートの間で通信を行うことができます。USB から RS-485 アダプタは、PC に接続されると COM ポートを作成する必要があります。アダプタのもう一方の端には、RS-485 のデータ A およびデータ B 接続用のワイヤ、GND 接続、および 5V 電源接続があり、これらはすべて、端子ブロックのピンの横にある接続ラベルに従って、設計の J25 ネジ端子ブロックに接続される必要があります。この回路をテストするため、次に示す USB から RS-485 へのアダプタが特に使用されます: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Cables/DS_USB_RS485_CABLES.pdf。この特定のアダプタで、データ A 接続はオレンジ色、データ B 接続は黄色、GND 接続は黒色、5V 電源接続は赤色のワイヤです。
3. GUI フォルダを開き、テキストエディタで calibration-config.xml を開きます。

4. meter タグ内の port name フィールドを、システムに接続されている COM ポートに変更します。図 3-10 に示すように、このフィールドは [COM7] に変更されます。

```

260 </correction>
261 </phase>
262 <temperature/>
263 <rtc/>
264 </cal-defaults>
265 <meter position="1">
266 <port name="com7" speed="9600"/>
267 </meter>
268 <reference-meter>
269 <port name="USB0::0x0A69::0x0835::A66200101281::INSTR"/>
270 <type id="chroma-66202"/>
271 <log requests="on" responses="on"/>
272 <scaling voltage="1.0" current="1.0"/>
273 </reference-meter>

```

図 3-10. エネルギー測定システムと通信するように GUI 構成ファイルを変更

5. GUI フォルダにある calibrator.exe ファイルを実行します。前の手順で、calibration-config.xml の COM ポートが、リファレンス デザインに接続されている COM ポートに変更されれば、GUI が開きます (図 3-11 を参照)。GUI が設計に正しく接続されていれば、左上のボタンは緑色です。接続に問題がある場合や、コードが正しく構成されていない場合、ボタンは赤色です。緑色のボタンをクリックすると、結果が表示されます。

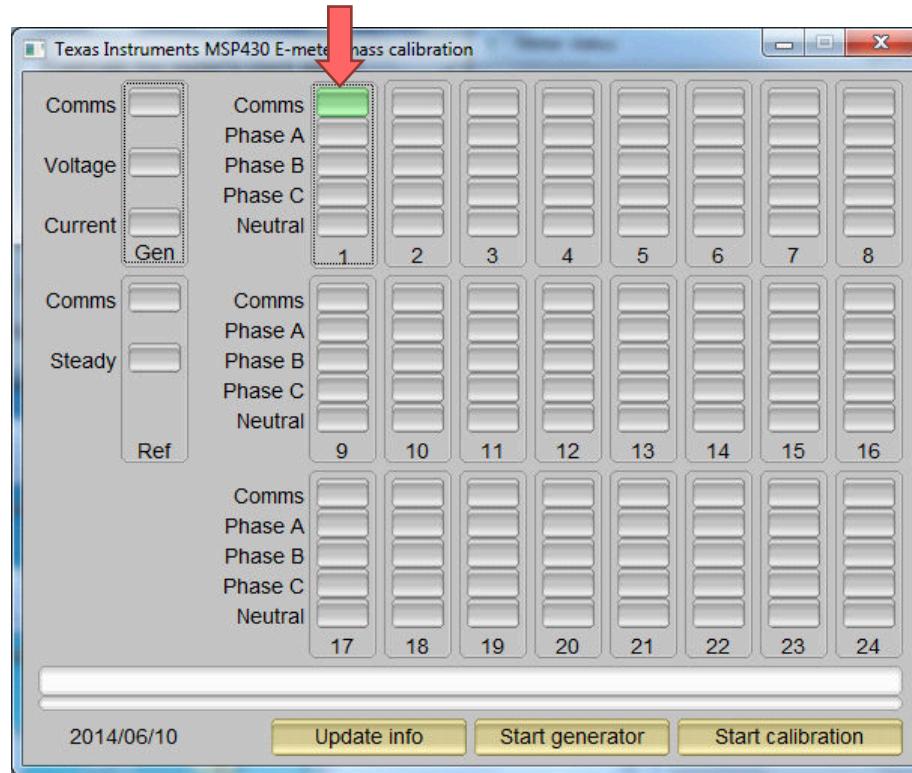


図 3-11. GUI スタートアップ ウィンドウ

緑色のボタンをクリックすると、結果ウィンドウが開きます (図 3-12 を参照)。この図では、[Power factor] の値の末尾に [L] または [C] があり、それぞれ誘導性負荷または容量性負荷を示しています。

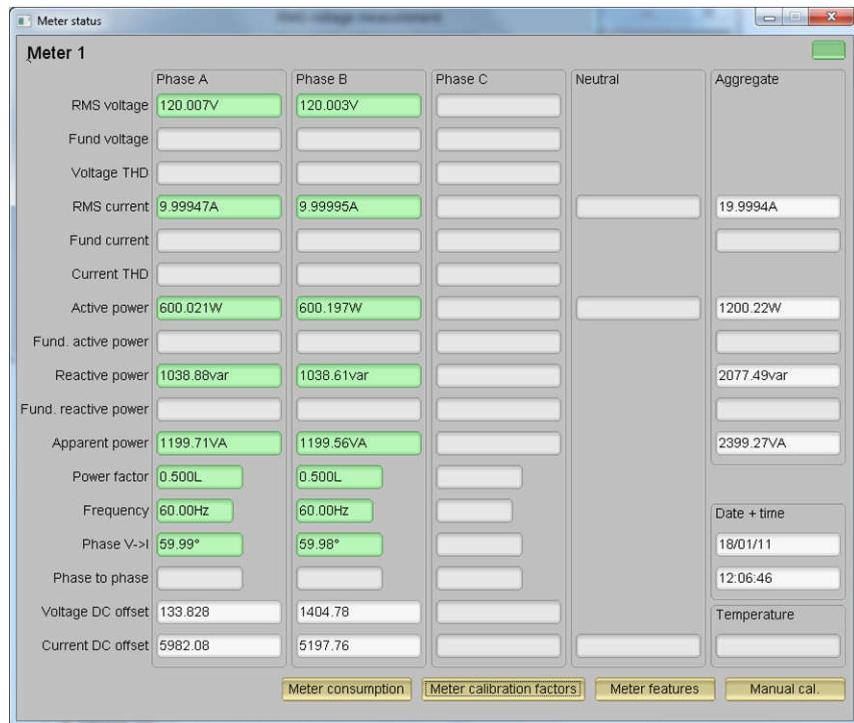


図 3-12. GUI の結果ウィンドウ

結果ウィンドウで [Meter consumption] ボタンをクリックすると、合計エネルギー消費量の測定値を表示できます。ユーザーがこのボタンをクリックすると、図 3-13 に示すように、[Meter events and consumption] ウィンドウが開きます。

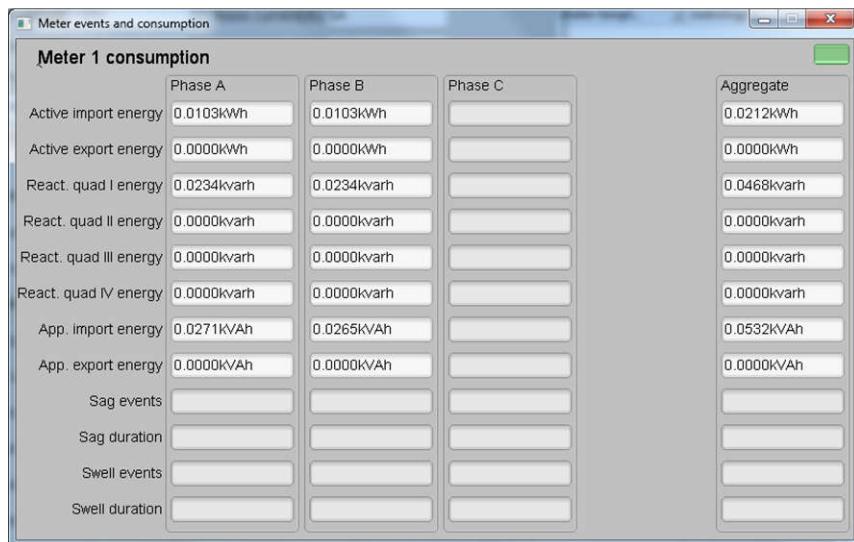


図 3-13. [Meter Events and Consumption] ウィンドウ

結果ウィンドウでは、[Meter features] ボタンをクリックしてメーターの設定を表示する、[Meter calibration factors] ボタンをクリックしてシステムのキャリブレーション係数を表示する、または [Manual cal.] ボタンをクリックしてシステムのキャリブレーション用のウィンドウを開くこともできます。

3.2.1.3.2.2 較正

どのようなメータでも、性能を発揮するためキャリブレーションは重要で、絶対に不可欠なプロセスです。どのメータも最初は、シリコンのばらつき、センサの精度、その他の受動的公差により、それぞれ精度が異なります。それらの影響を打ち消すには、すべてのメータにキャリブレーションが必要です。キャリブレーションを正確に行うには、高精度の AC テストソースとリファレンス メータを使用できる必要があります。このソースは、必要な電圧、電流、位相シフト (V と I の間) を生成できる必要があります。測定の誤差を計算するため、リファレンス メータは、ソースとキャリブレーション対象のメータの間のインターフェイスとして機能します。このセクションでは、この 3 相設計のキャリブレーションのための簡単で効果的な方法について説明します。

結果の表示用の GUI を使用して、デザインのキャリブレーションを簡単に行えます。キャリブレーション時には、キャリブレーション係数と呼ばれるパラメータがテストソフトウェアで変更され、測定誤差が最小限に抑えられます。このメータには、各位相に 6 つの主要なキャリブレーション係数があります。電圧スケーリング係数、有効電力オフセット (GUI では電圧 AC オフセットと表示されていますが、これは誤りです)、電流スケーリング係数、無効電力オフセット (GUI では電流 AC オフセットと表示されていますが、これは誤りです)、電力スケーリング係数、位相補償係数です。電圧、電流、電力のスケーリング係数は、計測ソフトウェアで測定された数量を、それぞれボルト、アンペア、ワット単位で表される実際の値に変換したものです。電力オフセットは、電圧から電流へのクロストークを減算するために使用されます。この値は一定の電力オフセットとして現れ、低電流で誤差が大きくなります。オフセットキャリブレーションは、この特定の設計のテストには使用されないように注意してください。最後のキャリブレーション係数は位相補償係数で、電流センサや他の受動部品によって生じる位相シフトを補償するために使用されます。電圧、電流、電力のキャリブレーション係数は互いに独立していることに注意してください。したがって、電圧のキャリブレーションを行っても、RMS 電流または電力の測定値に影響しません。

初めて MSP432 デバイスにメータ SW がフラッシュされると、デフォルトの較正係数がこれらの較正係数にロードされます。これらの値は、キャリブレーション中に GUI で変更します。較正係数は INFO_MEM に保存されるため、メータが再起動しても同じ値のまま維持されます。

いずれかのスケーリング係数のキャリブレーションを、ゲイン補正と呼びます。位相補償係数のキャリブレーションは、位相補正と呼びます。キャリブレーションプロセスの全体を通して、AC テストソースをオンにし、メータの接続を [セクション 3.1.2.1](#) と一貫させ、エネルギー パルスをリファレンス メータに接続しておく必要があります。

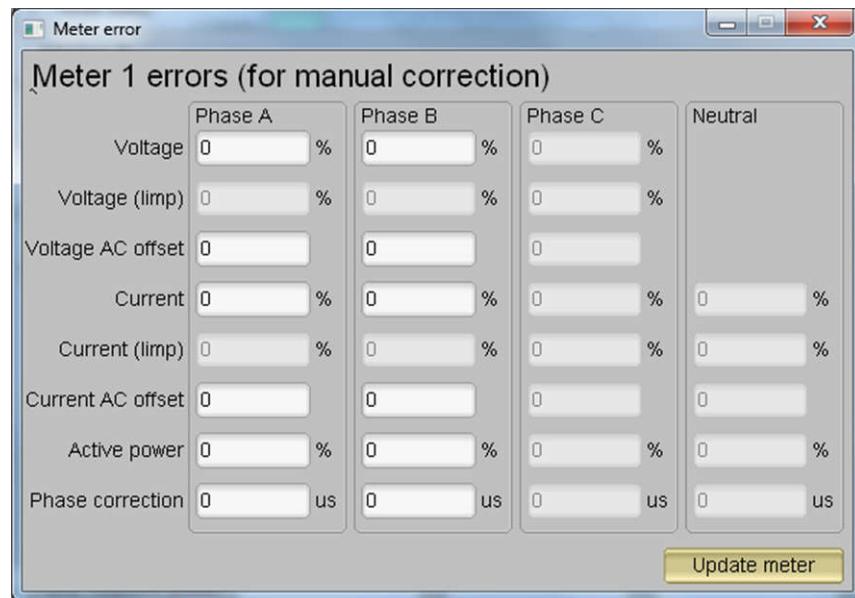
3.2.1.3.2.2.1 ゲインのキャリブレーション

通常、電圧と電流のゲイン補正是、すべての位相に対して同時に行うことができます。ただし、有効電力のゲイン補正是行うには、各位相のリファレンス メータのエネルギー精度 (%) が必要です。また、いずれかの位相について有効電力のキャリブレーションを行うときは、他の位相の電流を止めてオフにします。ただし、他の電圧はイネーブルのままにしておく必要があります。

3.2.1.3.2.2.1.1 電圧および電流ゲインのキャリブレーション

電圧および電流の読み取り値のキャリブレーションは、次の手順で行います。

1. GUI を接続すると、電圧、電流、有効電力、他の測定パラメータの結果が表示されます。
2. テストソースを構成して、すべてのフェーズに必要な電圧と電流を供給します。これらが、各位相の電圧と電流の間で位相シフトが 0 になっている電圧と電流のキャリブレーション ポイントであることを確認します。たとえば、120V、10A、0° (PF = 1) です。通常、これらの値はすべての位相で同じです。
3. 図 3-12 を表示する [Manual cal.] ボタンをクリックします。図 3-14 から次の画面が表示されます:

**図 3-14. [Manual Culibration] ウィンドウ**

4. それぞれの電圧と電流の補正值を計算します。電圧および電流のフィールドに入力する必要のある補正值は、式 17 を使用して計算します。

$$\text{Correction (\%)} = \left(\frac{\text{value}_{\text{observed}}}{\text{value}_{\text{desired}}} - 1 \right) \times 100 \quad (17)$$

ここで、

- $\text{value}_{\text{observed}}$ は、テキサス・インストルメンツのメータで測定された値です
- $\text{value}_{\text{desired}}$ は、AC テストソースで構成されたキャリブレーション ポイントです

5. すべての電圧と電流を計算した後で、対応する位相の電圧と電流のフィールドに、これらの値をそのまま (\pm) 入力します。
6. [Update meter] ボタンをクリックすると、GUI の電圧と電流について測定された値が、目的の電圧と電流に即座にセーティングされます。

3.2.1.3.2.2.1.2 有効電力ゲインのキャリブレーション

注

このセクションは、単相での例です。他の位相については、これらの手順を繰り返してください。

電圧および電流のゲイン補正を行ってから、有効電力のゲイン補正を行う必要があります。有効電力のゲイン補正是、電圧や電流の補正と異なる方法で行われます。概念的には、電圧と電力と同様に有効エネルギーの誤差 % を計算することは可能ですが、この方法は最も正確ではなく、避けるべきです。

% 単位の補正量は、有効電力のリファレンス メータでの測定誤差から直接判定するのが最良の方法です。この誤差は、エネルギー パルスをリファレンス メータに供給することで得られます。有効電力のキャリブレーションは、次の手順で行います。

1. システムの電源をオフにし、システムのエネルギー パルス出力をリファレンス メータに接続します。これらのパルス入力に基づいて有効電力の誤差を測定するよう、リファレンス メータを構成します。
2. AC テスト電源をオンにします。
3. 同じセクションで使用したものと同一の電圧、電流、および 0° の位相シフトを用いて、セクション 3.2.1.3.2.2.1.1 の手順 1 から手順 3 を繰り返します。
4. リファレンス メータから % 単位の測定誤差を取得します。この値は負になる可能性があることに注意してください。

5. 手順 4 で取得した誤差を、GUI ウィンドウの対応する位相の下にある [**Active Power**] フィールドに入力します。この誤差はすでに値で、計算は必要ありません。
6. [**Update meter**] ボタンをクリックすると、リファレンスメータの誤差値が 0 に近い値ですぐに安定します。

3.2.1.3.2.2.2 オフセット キャリブレーション

ゲイン キャリブレーションを行った後、低電流での精度が許容できない場合は、オフセット キャリブレーションを実行できます。オフセット キャリブレーションにより、位相の電流チャネルへのクロストークなどのクロストークがライン電圧から除去されます。

位相について有効電力オフセットのキャリブレーションを実行するには、有効電力の読み取り値 (mW 単位) から減算するオフセットを、有効電力オフセットの現在の値 ([meter calibration factors] ウィンドウで [**Voltage AC offset**] のラベルが付いている項目) に単純に加算してから、その新しい値を [**Manual Calibration**] ウィンドウの [**Voltage AC offset**] フィールドに入力します。例えば、メーターのキャリブレーション ウィンドウで「電圧 AC オフ」の値が 200 (0.2W) であり、さらに 0.300mW を差し引きたい場合、[**Manual Calibration**] ウィンドウの [**Voltage AC offset**] フィールドに 500 の値を入力します。[**Manual Calibration**] ウィンドウの [**Voltage AC offset**] フィールドに値を入力してから、[**Update meter**] ボタンを押します。

ある位相について無効電力オフセットのキャリブレーションを行うには、有効電力オフセットのキャリブレーションを行うのと同様のプロセスに従います。無効電力の読み取り値 (mvar 単位) から減算するオフセットを、無効電力オフセットの現在の値 ([meter calibration factors] ウィンドウで [**Current AC offset**] のラベルが付いている項目) に加算してから、その値を [**Manual Calibration**] ウィンドウの [**Current AC offset**] フィールドに入力します。[**Manual Calibration**] ウィンドウの [**Current AC offset**] フィールドに値を入力してから、[**Update meter**] ボタンを押します。

3.2.1.3.2.2.3 位相キャリブレーション

電力ゲイン補正の後で、位相キャリブレーションを行います。有効電力ゲインのキャリブレーションと同様に、1 つの位相で位相補正を行うには、他の位相をディセーブルする必要があります。位相補正のキャリブレーションは、次の手順で行います。

1. AC テストソースをオフにした、または再構成した場合は、「[セクション 3.2.1.3.2.2.1.1](#)」のステップ 1 からステップ 3 までを、そのセクションで使用されているのと同じ電圧と電流を使用して実行します。
2. 現在のキャリブレーションの対象でない、他のすべての位相の電流を 0A に設定し、ディセーブルします。
3. 位相シフトのみを 0 以外の値に変更します。通常は +60° を選択します。これによって、リファレンスマータに、有効電力測定について異なる % 誤差が表示されます。この値は負になる可能性があることに注意してください。
4. ステップ 3 の誤差が 0 に近くない、または許容できない場合は、次の手順に従って位相補正を実行します。
 - a. キャリブレーション中の位相について、[**Phase Correction**] フィールドの更新値を入力します。通常、誤差を 0 に近づけるには、小さな \pm 整数値を入力する必要があります。さらに、位相シフトが 0 より大きい場合 (例: +60°)、正 (負) の誤差を補正するには正 (負) の値が必要です。
 - b. [**Update meter**] ボタンをクリックし、リファレンスマータの誤差値を監視します。
 - c. この測定誤差 (%) が十分な精度でない場合は、ステップ 4a とステップ 4b に基づいて、値を 1 だけインクリメントまたはデクリメントすることで微調整します。ただし、ある程度調整が行われた後では、この微調整を行っても誤差が 0 の前後を往復するだけであることに注意してください。絶対誤差が最も小さくなる値を選択する必要があります。
 - d. ここで位相を -60° に変更し、この誤差が許容範囲内であることを確認します。遅延と先行の条件で、同じ位相シフトについて誤差が対称的なのが理想です。

位相キャリブレーションを行うと、1 つの位相についてキャリブレーションが完了します。他の位相について、ゲイン キャリブレーション、オフセット キャリブレーション、位相キャリブレーションを行う必要があります。

これで、すべての位相の電圧、電流、電力のキャリブレーションが完了します。[図 3-12](#) に示す GUI の計測結果ウィンドウで、[**Meter calibration factors**] ボタンをクリックし、新しいキャリブレーション係数を確認します ([図 3-15](#) を参照)。ここに表示されるキャリブレーション係数のうち、「**Voltage AC off**」パラメータはそれぞれの測定値から有効電力オフセット (mW 単位) を減算した値、「**Current AC offset**」パラメータは無効電力の読み取り値から無効電力オフセット (mvar 単位) を減算した値を実際に示していることに注意してください。これは、2 電圧構成を使用するメータのキャリブレーション係数の例も示しています。同じメータを 1 電圧構成用に設定すると、電圧と有効電力のスケーリング係数は、[図 3-12](#) に示されています。

る値の約半分になります。両位相の電圧読み取りには、ライン間電圧測定が使用され、ラインと中性線間の 2 つの電圧を測定する代わりに が使用されます。分割位相システムの理想的な条件では、ライン間電圧測定の RMS 値は、2 つのラインから中性線への RMS 測定値それぞれの 2 倍です。つまり、ADC に供給される電圧も、ラインから中性線への電圧を測定する場合と比べて、ライン間電圧を測定する場合は 2 倍です。結果として 1 電圧構成では、電圧と電力の読み取り値を追加係数 2 で除算する必要があります。有効電力と電圧ゲインのキャリブレーション手順を実行すると、この除算は自動的に行われます。

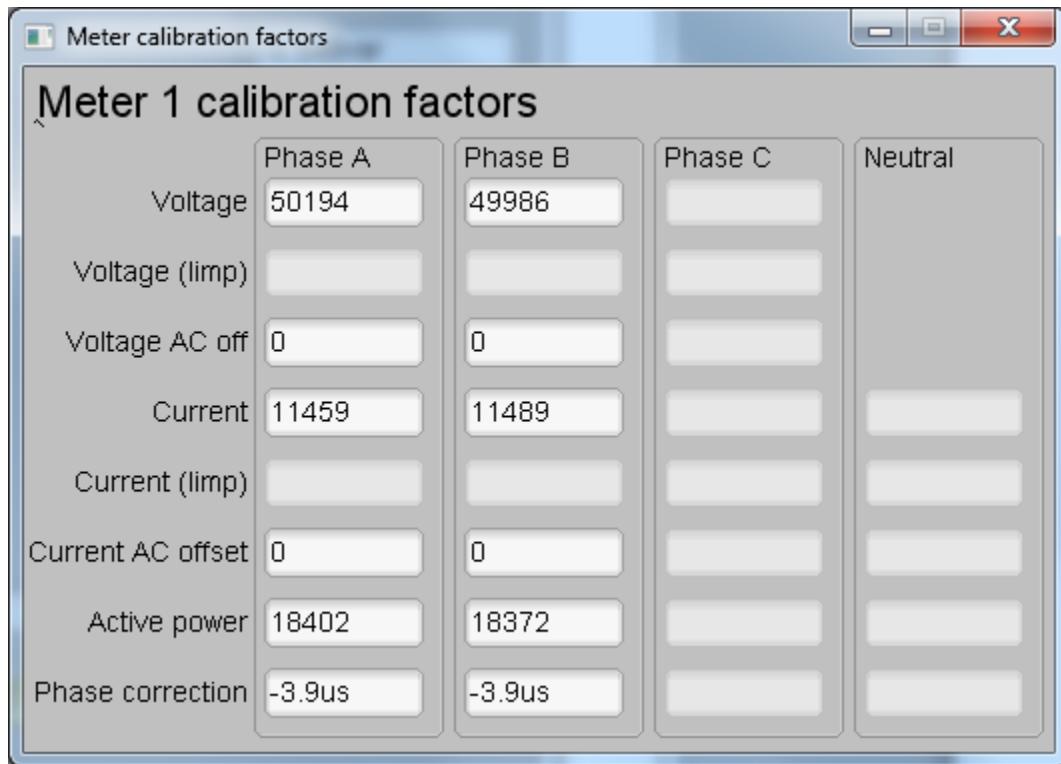


図 3-15. [Calibration Factors] ウィンドウ

図 3-12 に示されている [Meter features] ボタンをクリックすると、図 3-16 のウィンドウが表示されます。

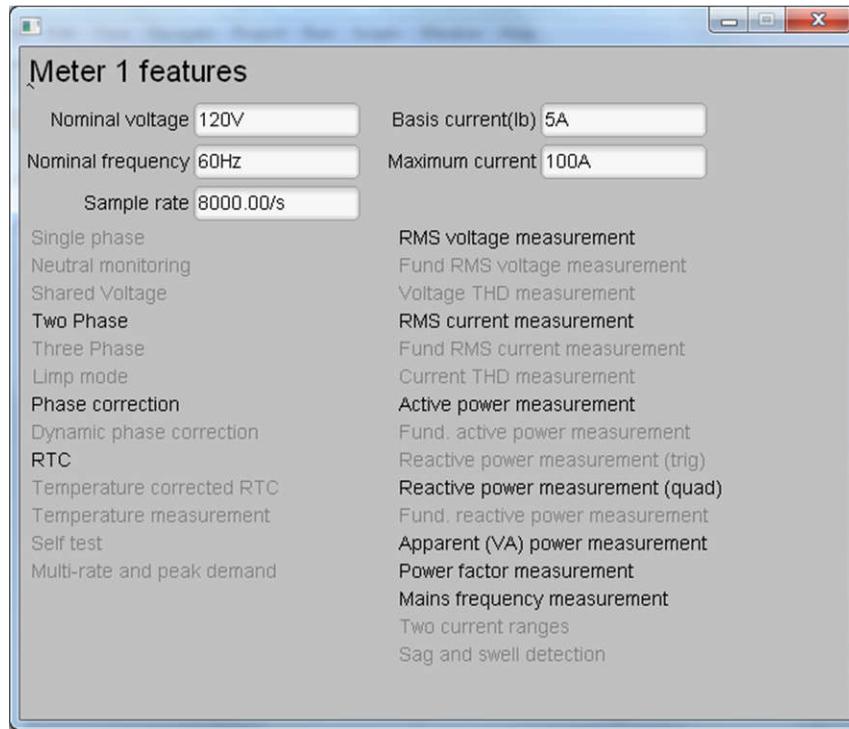


図 3-16. [Meter Features] ウィンドウ

3.2.2 テスト結果

3.2.2.1 SVS と eFuse 機能テストの結果

表 3-3. SVS テスト結果

条件	測定される電圧 (V)	データシートの標準電圧値 (V)
負の電圧スレッショルド、VIT-	2.00V	2.00 ±1% V
正の電圧スレッショルド、VIT+ = VIT- + VHYS	2.11V	2.10V
ヒステリシス電圧、VHYS = VIT+ - VIT-	2.11 – 2.00 = 0.11 V	2.1 – 2.0 = 0.10 V

VIT- および VHYS の測定値は、データシートで期待される値とよく一致しています。

表 3-4. eFuse のテスト結果

条件	測定される電圧 (V)	期待される電圧値 (V)
電源故障検出スレッショルド (VIN 立ち下がり)	4.05V	4.26 - 0.224 = 4.04V (データシートに基づく内部 UVLO スレッショルド、立ち上がり、ヒステリシスの標準値)
UVLO 解放 (VIN 立ち上がり)	4.28V	4.26V (データシートの典型的な値に基づく内部 UVLO スレッショルド、立ち上がり)
過電圧リリース状態 (VIN 立ち下がり)	5.62V	5.57V (TPS25921 の計算シートと選択した抵抗値から取得)
過電圧カットオフ スレッショルド (VIN 立ち上がり)	5.81V	5.78V (TPS25921 の計算シートと選択した抵抗値から取得)

電力故障検出しきい値および過電圧カットオフしきい値の測定値は、期待される値とほぼ一致しています。さらに、サーマルシャットダウンの原因となるように測定した過電流スレッショルドの値は 1.62A でした。

3.2.2.2 電気メータの計測精度の結果

以下のテスト結果では、ゲインと位相のキャリブレーションがメータに適用されています。これらの結果で、有効エネルギーの結果は 0° の位相シフトで 0.1% 以内です。 60° および -60° の位相シフトでは、電力計測基準で精度が緩和されているため、結果が高い電流で偏差する傾向は、電流に応じて CT の位相シフトが変化することから生じています。さらに、有効エネルギーと電圧の関係の結果と RMS 電圧の結果から、電圧チャネルに ADC 範囲の一部しか使用していないにもかかわらず、良好な精度の結果が得られることがわかります。

表 3-5. 位相 A のアクティブ エネルギーの誤差 % と電圧との関係、2 電圧モード

電圧 (V)	誤差 %
240	0.0113
120	-0.0067
60	-0.01
30	-0.012
15	-0.015

表 3-6. 位相 A の有効エネルギーの誤差 % と電流との関係、2 電圧モード

電流 (A)	0°	60°	-60°
0.05	-0.02	0.007	-0.062
0.10	-0.025	0.017	-0.057
0.25	-0.007	0.031	-0.051
0.50	0.001	0.029	-0.031
1.00	0.0075	0.034	-0.021
2.00	0	0.04	-0.036
5.00	0.003	0.019	-0.019
10.00	0.007	0.009	-0.004
20.00	-0.007	0.006	-0.013
30.00	0.0007	-0.002	0.006
40.00	0.002	-0.007	0.013
50.00	-0.009	-0.04	0.032
60.00	-0.0007	-0.049	0.0445
70.00	0.0003	-0.052	0.058
80.00	0.004	-0.064	0.074
90.00	0.01	-0.065	0.0845
100.00	0.014	-0.07	0.101

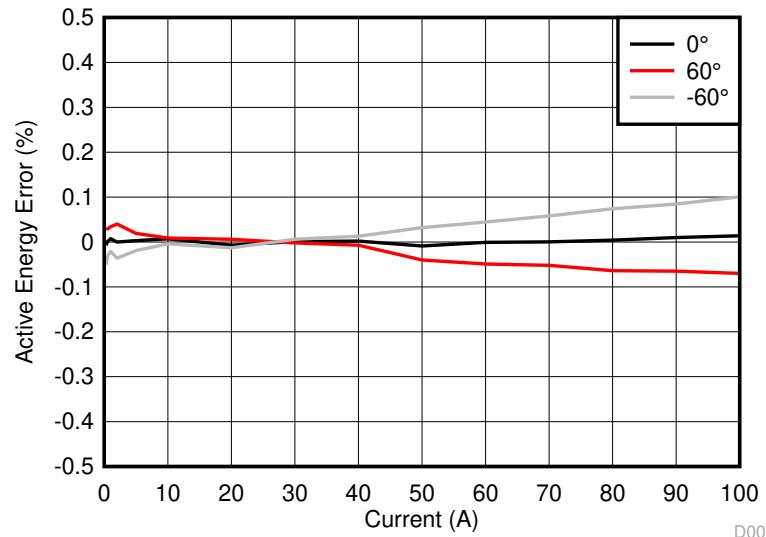


図 3-17. 位相 A の有効エネルギーの誤差 % と電流との関係、2 電圧モード

表 3-7. 位相 B 有効エネルギー誤差 % と電圧との関係、2 電圧モード

電圧 (V)	誤差 %
240	0.011
120	-0.0003
60	-0.004
30	-0.0047
15	-0.0067

表 3-8. 位相 B 有効エネルギーと誤差 % と電流の関係、2 電圧モード

電流 (A)	0°	60°	-60°
0.05	-0.032	-0.007	-0.122
0.10	-0.019	0.019	-0.083
0.25	-0.019	0.032	-0.058
0.50	-0.007	0.045	-0.062
1.00	-0.007	0.045	-0.045
2.00	-0.015	0.032	-0.06
5.00	-0.007	0.026	-0.036
10.00	-0.0087	0.009	-0.025
20.00	-0.019	-0.019	-0.028
30.00	-0.019	-0.036	-0.011
40.00	-0.023	-0.045	0
50.00	-0.014	-0.06	0.0395
60.00	-0.011	-0.075	0.045
70.00	-0.01	-0.074	0.054
80.00.	-0.0077	-0.08	0.064
90.00	0.003	-0.068	0.066
100.00	0.011	-0.042	0.052

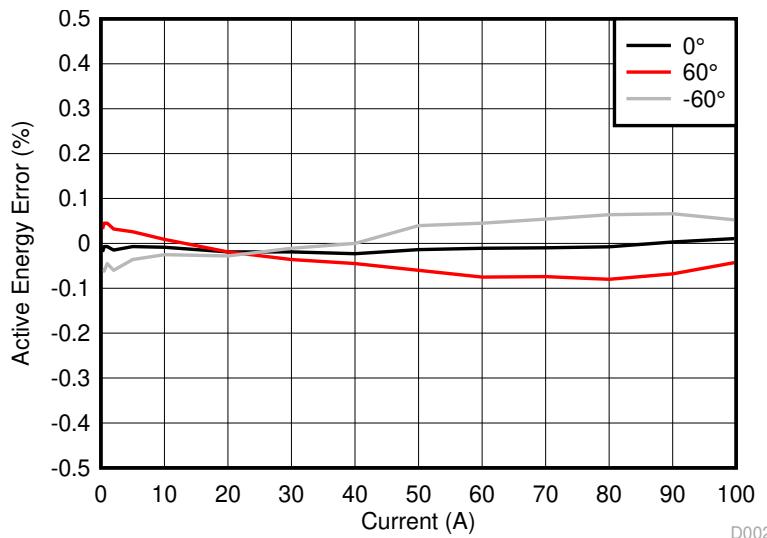


図 3-18. 位相 B 有効エネルギーと誤差 % と電流の関係、2 電圧モード

表 3-9. 累積位相有効エネルギー誤差 % と電圧との関係、
2 電圧モード

電圧 (V)	誤差 %
240	0.0353
120	0.022
60	0.016
30	0.014
15	0.013

表 3-10. 累積位相有効エネルギー誤差 % と電流との関係、2 電圧モード

電流 (A)	0°	60°	-60°
0.05	0.019	0.045	-0.032
0.10	0.006	0.058	-0.032
0.25	0.0125	0.045	-0.0385
0.50	0.006	0.032	-0.032
1.00	0.015	0.045	-0.019
2.00	0.003	0.045	-0.039
5.00	0.006	0.024	-0.012
10.00	0.01	0.0165	0
20.00	-0.007	0.002	-0.013
30.00	0.002	-0.007	0.0085
40.00	0	-0.016	0.019
50.00	-0.003	-0.035	0.042
60.00	0.002	-0.047	0.053
70.00	0.009	-0.047	0.063
80.00.	0.007	-0.05	0.067
90.00	0.013	-0.045	0.08
100.00	0.0223	-0.04	0.092

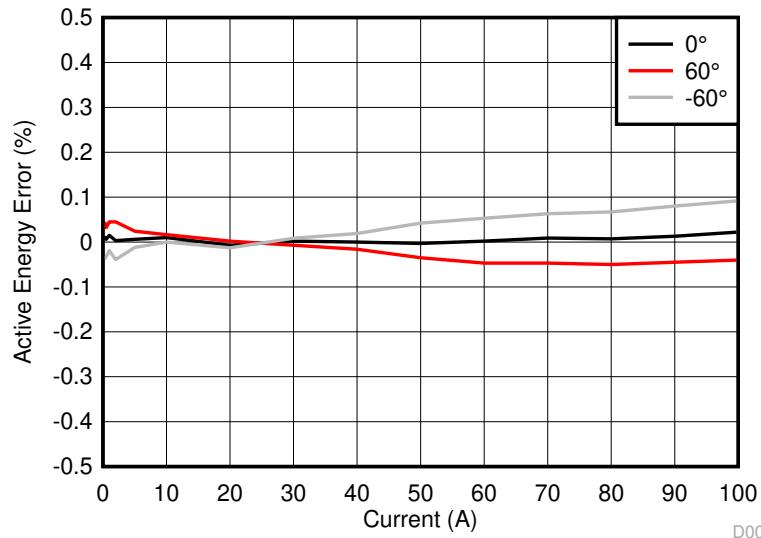


図 3-19. 累積位相有効エネルギー誤差 % と電流との関係、2 電圧モード

表 3-11. 累積位相有効エネルギー誤差 % と電圧との関係、単一電圧モード

電圧 (V)	誤差 %
240	-0.005
120	-0.024
60	-0.031
30	-0.036
15	-0.043

表 3-12. 累積位相有効エネルギー誤差 % と電流との関係、単一電圧モード

電流 (A)	0°	60°	-60°
0.05	-0.058	-0.045	-0.147
0.10	-0.045	-0.007	-0.096
0.25	-0.019	0.019	-0.083
0.50	-0.0255	0.032	-0.07
1.00	-0.011	0.019	-0.058
2.00	-0.017	0.025	-0.07
5.00	-0.0233	0.011	-0.053
10.00	-0.0177	0.005	-0.04
20.00	-0.026	-0.0023	-0.0355
30.00	-0.017	-0.019	-0.0123
40.00	-0.013	-0.0225	-0.01
50.00	-0.031	-0.058	-0.001
60.00	-0.023	-0.06	0.012
70.00	-0.0183	-0.058	0.023
80.00.	-0.005	-0.052	0.027
90.00	-0.009	-0.049	0.036
100.00	0.0013	-0.045	0.045

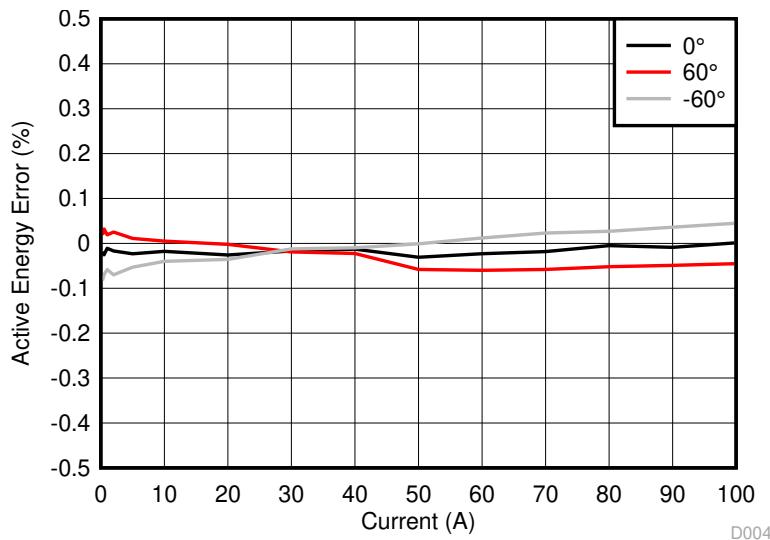


図 3-20. 累積位相有効エネルギー誤差 % と電流との関係、単一電圧モード

表 3-13. 累積無効エネルギー誤差 % と電流との関係、2 電圧モード

電流 (A)	30°	60°	-30°	-60°
0.05	-0.003	0.004	-0.023	-0.027
0.10	-0.037	-0.013	0.011	-0.008
0.25	-0.067	-0.027	0.043	0.002
1.00	-0.044	-0.021	0.0415	0.011
5.00	-0.036	-0.0183	0.022	0.001
10.00	-0.03	-0.012	0.014	-0.003
20.00	-0.041	-0.026	-0.0035	-0.013
40.00	-0.01	-0.016	-0.021	-0.016
60.00	0.025	-0.0007	-0.047	-0.0247
80.00	0.041	0.0085	-0.048	-0.021
100.00	0.054	0.02	-0.044	-0.012

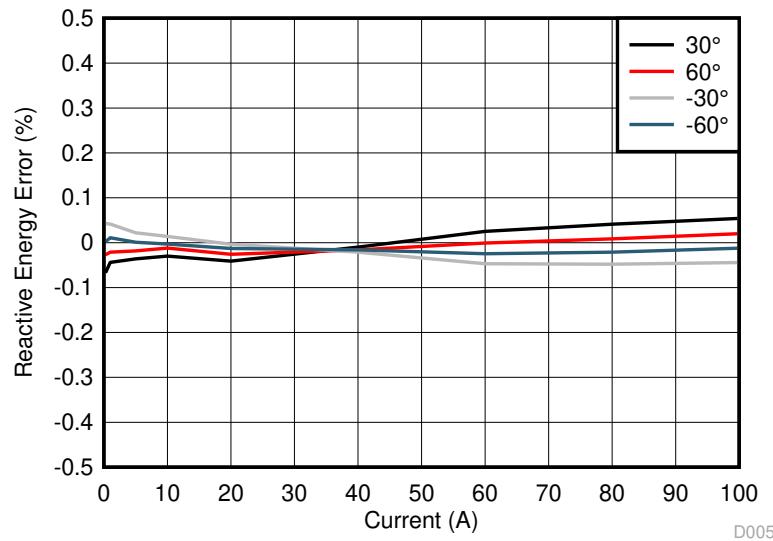


図 3-21. 累積無効エネルギー誤差 % と電流との関係、2 電圧モード

表 3-14. 累積有効エネルギー測定誤差と周波数との関係、公称周波数から ±2Hz

条件	58Hz	60Hz	62Hz
0.5A, 0	0.006	0.0017	-0.007
0.5A, 60	0.058	0.032	0.032
0.5A, 300	-0.045	-0.032	-0.032
10A, 0	0.0047	-0.001	-0.0033
10A, 60	0.025	0.0073	0.008
10A, 300	-0.0105	-0.009	-0.013

表 3-15. 位相 A の RMS 電流の誤差 %、2 電圧モード

電流 (A)	GUI 電流の読み取り値 (A)	リファレンスメーターの読み取り値 (A)	誤差 %
0.05	0.050053	0.050031	0.0440
0.10	0.100039	0.099988	0.0510
0.25	0.250034	0.24997	0.0256
0.50	0.50005	0.49992	0.0260
1.00	1.00017	0.99979	0.0380
2.00	2.00021	1.9996	0.0305
5.00	5.00039	4.9986	0.0358
10.00	10.0013	9.9971	0.0420
20.00	20.0007	19.993	0.0385
30.00	30.0025	29.991	0.0383
40.00	40.0038	39.988	0.0395
50.00	50.0054	49.989	0.0328
60.00	60.0066	59.984	0.0377
70.00	70.0091	69.981	0.0402
80.00.	80.0127	79.981	0.0396
90.00	90.018	89.976	0.0467
100.00	100.024	99.974	0.0500

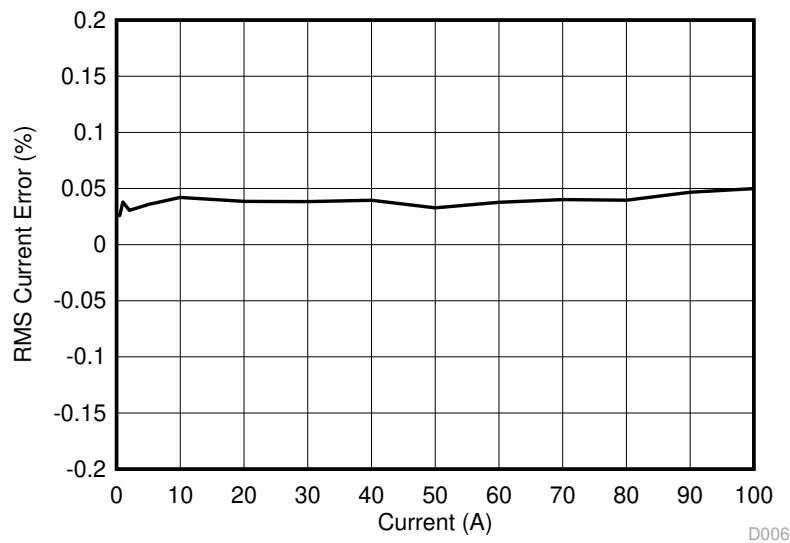
**図 3-22. 位相 A の RMS 電流の誤差 %、2 電圧モード**

表 3-16. 位相 B の RMS 電流の誤差 % と電流との関係、2 電圧モード

電流 (A)	GUI 電流の読み取り値 (A)	リファレンスマーターの読み取り値 (A)	誤差 %
0.05	0.050083	0.05005	0.0659
0.10	0.100055	0.10002	0.0350
0.25	0.250019	0.24996	0.0236
0.50	0.500016	0.49989	0.0252
1.00	1.00008	0.99984	0.0240
2.00	2.00016	1.9999	0.0130
5.00	4.99979	4.9987	0.0218
10.00	9.99998	9.9982	0.0178
20.00	19.9986	19.998	0.0030
30.00	29.9948	29.992	0.0093
40.00	39.9936	39.99	0.0090
50.00	49.9918	49.983	0.0176
60.00	59.9906	59.979	0.0193
70.00	69.9921	69.981	0.0159
80.00.	79.9924	79.976	0.0205
90.00	89.9942	89.97	0.0269
100.00	99.9997	99.97	0.0297

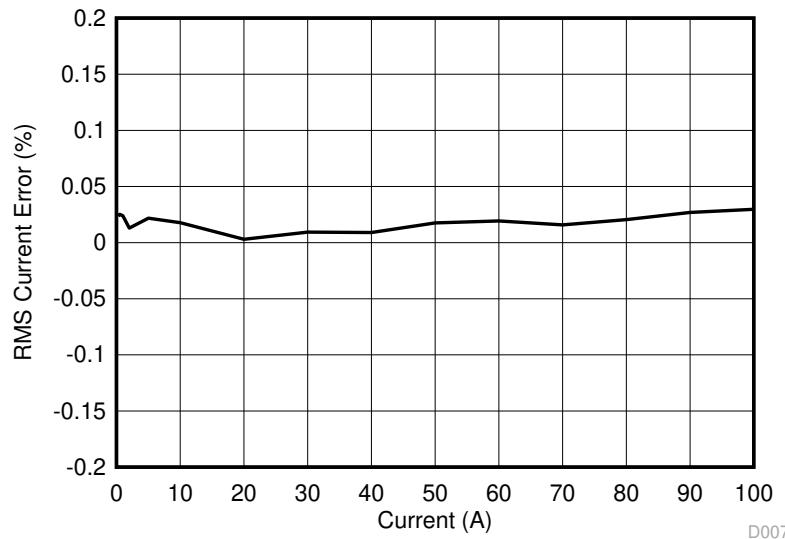


図 3-23. 位相 B の RMS 電流の誤差 % と電流との関係、2 電圧モード

表 3-17. 位相 A の RMS 電圧の誤差 %、2 電圧モード

電圧 (V)	GUI 電圧の読み取り値 (V)	リファレンスメーターの読み取り値 (V)	誤差 %
9	9.002	9.0034	-0.0155
10	10.003	10.004	-0.0100
30	29.999	30.002	-0.0100
50	50.002	49.999	0.0060
70	70.004	70.001	0.0043
90	90.007	89.999	0.0089
100	100.01	100	0.0100
120	120.016	120	0.0133
140	140.025	140.01	0.0107
160	160.028	160	0.0175
180	180.035	180	0.0194
200	200.049	200	0.0245
220	220.057	220	0.0259
230	230.067	230	0.0291
240.	240.074	240	0.0308
260	260.087	260.02	0.0258
270	270.104	270.03	0.0274

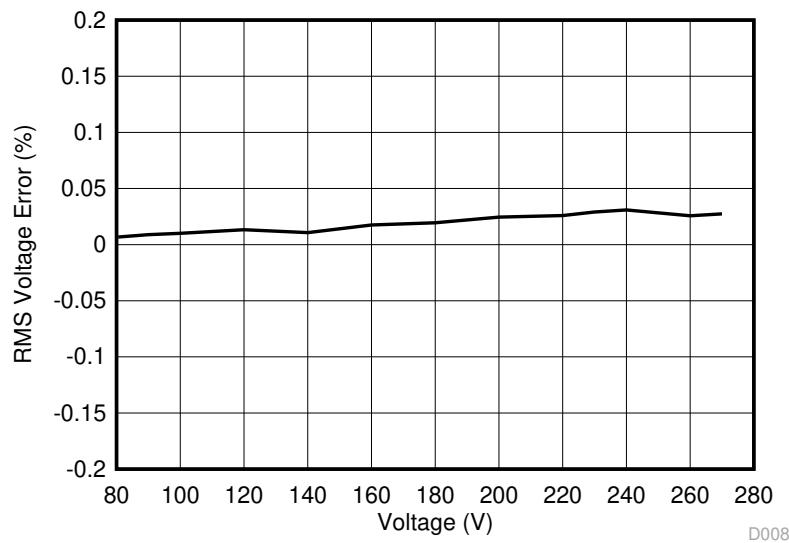
**図 3-24. 位相 A の RMS 電圧の誤差 %、2 電圧モード**

表 3-18. 位相 B の RMS 電圧の誤差 % と電圧との関係、2 電圧モード

電圧 (V)	GUI 電圧の読み取り値 (V)	リファレンスマーターの読み取り値 (V)	誤差 %
9	8.999	9	-0.0111
10	9.99995	9.9995	0.0045
30	29.997	29.997	0.0000
50	49.999	49.995	0.0080
70	70.002	70	0.0029
90	90.009	90.002	0.0078
100	100.01	100	0.0100
120	120.017	120	0.0142
140	140.027	140.01	0.0121
160	160.03	160.01	0.0125
180	180.042	180	0.0233
200	200.056	200.01	0.0230
220	220.069	220.01	0.0268
230	230.079	230.02	0.0256
240.	250.087	250.02	0.0268
260	260.103	260.03	0.0281
270	270.114	270.03	0.0311

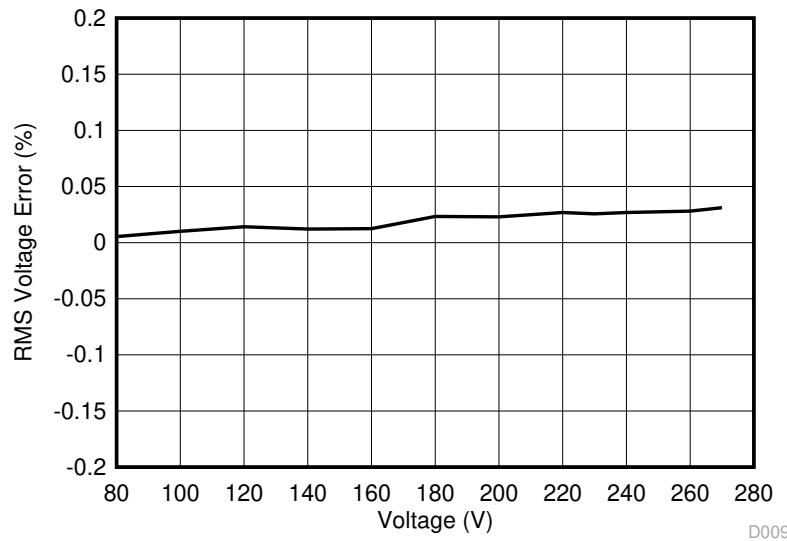
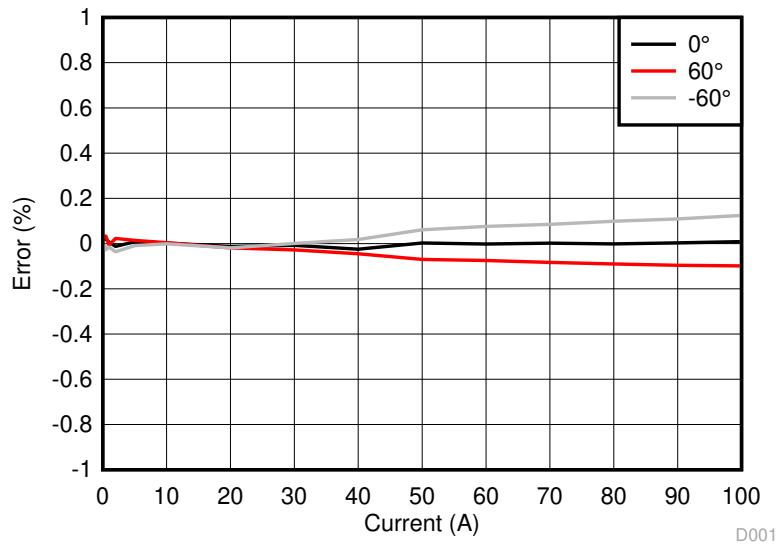


図 3-25. 位相 B の RMS 電圧の誤差 % と電圧との関係、2 電圧モード

表 3-19. 有効エネルギー誤差 % と電流との関係、32ksps

電流 (A)	0°	60°	-60°
0.05	0.033	0.078	0.028
0.1	0	0.002	-0.02
0.25	0.0225	0.035	-0
0.5	0.0183	0.032	-0.03
1	0.0063	-0.0063	-0.02
2	-0.0123	0.023	-0.04
5	0.008	0.014	-0.01
10	0.0025	0.004	-0
20	-0.013	-0.019	-0.02
30	-0.0077	-0.028	7E-04
40	-0.025	-0.045	0.018
50	0.0027	-0.07	0.061
60	-0.002	-0.075	0.076
70	0.002	-0.0833	0.085
80	-0.0015	-0.09	0.099
90	0.003	-0.096	0.109
100	0.009	-0.099	0.125


図 3-26. 有効エネルギー誤差 % と電流との関係、32ksps

4 デザインファイル

4.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDA-010037](#) のデザインファイルを参照してください。

4.2 部品表

部品表 (BOM) をダウンロードするには、[TIDA-010037](#) のデザインファイルを参照してください。

4.3 PCB レイアウトに関する推奨事項

この設計では、以下の一般的なガイドラインに従う必要があります。

- デカップリング コンデンサは、関連するピンの近くに配置します。
 - グランドトレースの代わりにグランドプレーンを使用し、特に **ADS131M04** の近くではグランドプレーンの切れ目を最小限にします。この設計では、上層と下層の両方にグランドプレーンがあります。このような場合、ビアを自由に使用して、プレーン間に良好なスティッヂが存在することを保証します。
 - ADC チャネルの入力への配線 2 本は、対称に、互いにできる限り近い位置に配置します。
 - 電力オフセットを行わないと、電圧から電流へのチャネルのクロストークにより、低電流での精度が低下する可能性があります。PCB 上で電圧と電流のクロストークを最小限に抑えるために、ADC チャネル 0 と 1 を電流チャネルに割り当て、チャネル 2 と 3 を電圧チャネルに割り当てるか、または ADC チャネル 0 と 1 を電圧チャネルに割り当て、チャネル 2 と 3 を電流チャネルに割り当てるかです。
 - ADS131M04** デバイスの場合、 $1\mu\text{F}$ のコンデンサよりも $0.1\mu\text{F}$ のコンデンサを、AVDD ピンの近くに配置します。DVDD に接続されている $0.1\mu\text{F}$ と $1\mu\text{F}$ のコンデンサも同様に配置します。
 - ADS131M04** の AINxP および AINxN ピンの順序は、あるコンバータから別のコンバータに移行する際に入れ替わることに注意してください。この入れ替わった順序は、電圧および電流端子に接続されたワイヤの接続順序を入れ替えることで対処されています (**J26** と **J27** の電流端子間でワイヤの順序が逆転し、**J28** と **J29** の電圧端子間でも逆転しています)
 - 水晶をマイクロコントローラに接続するために使用するトレースの長さは最小限に抑えます。水晶のリードの周囲にガードリングを配置し、水晶のハウジングを接地します。また、水晶の下はクリーンなグランドにします。水晶の下に配線を置くことは避ける必要があります。また、高周波信号は水晶から離して配置します。
 - 電源接続には広いパターンを使用します。
 - 絶縁型 RS-232 と RS-485 には別のグランドプレーンを使用します。この別のグランドプレーンは、RS-232 と RS-485 のグランドの電位なので、基板の他の場所で使用されている GND とは異なります。
 - この設計に使用している ISO7731B および ISO7720 絶縁デバイスについて、推奨される空間距離と沿面距離の条件を満たされていることを確認します。

4.3.1 レイアウト プリント

レイヤプロットをダウンロードするには、[TIDA-010037](#) のデザインファイルを参照してください。

4.4 Altium プロジェクト

Altium Designer® のプロジェクトファイルをダウンロードするには、[TIDA-010037](#) のデザイン ファイルを参照してください。

4.5 ガーバーファイル

ガーバー ファイルをダウンロードするには、[TIDA-010037](#) のデザイン ファイルを参照してください。

4.6 アヤンブリの画面

アセンブリの図面をダウンロードするには [TIDA-01003Z](#) のデザインファイルを参照してください。

5 関連資料

1. テキサス インスツルメンツ、[ADS131M04 4 チャネル、同時サンプリング、24 ビット、デルタシグマ ADC データシート](#)
2. テキサス インスツルメンツ、[MSP432P411x、MSP432P401x SimpleLink™ ミックスドシグナルマイコンデータシート](#)
3. テキサス インスツルメンツ、[TPS3840 ナノパワー、高入力電圧スーパーバイザ \(MR\) およびプログラム可能な遅延機能付き データシート](#)
4. テキサス インスツルメンツ、[TPS25921x 高精度の電流制限および過電圧保護機能搭載、4.5V ~ 18V eFuse データシート](#)
5. テキサス インスツルメンツ、[THVD1500 ±8kV IEC ESD 保護付き、500kbps、RS-485 トランシーバ データシート](#)
6. テキサス インスツルメンツ、[ISO773x 高速、基本絶縁型 3 チャネル デジタルアイソレータ データシート](#)
7. テキサス インスツルメンツ、[TRS3232E 3V~5.5V マルチチャネル RS-232 ラインドライバ/レシーバ、±15kV IEC ESD 保護データシート](#)

5.1 商標

SimpleLink™, テキサス・インスツルメンツの™, MSP432™, and are trademarks of Texas Instruments.

ARM®, Cortex®, and are registered trademarks of ARM Limited.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries).

Wi-Fi® is a registered trademark of Wi-Fi Alliance.

Bluetooth® is a registered trademark of Bluetooth SIG.

Altium Designer® is a registered trademark of Altium LLC or its affiliated companies.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

6 著者について

MEKRE MEGANAW は、テキサス インスツルメンツのグリッド インフラストラクチャ グループのシステム エンジニアで、主にグリッド監視のリファレンスデザインの開発に従事しています。Mekre はジョージア工科大学でコンピュータ工学の理学士号と修士号を取得しました。

MICKAEL CHOUTEAU は、テキサス インスツルメンツのフィールド アプリケーション エンジニアであり、産業分野のお客様の技術サポートを担当しています。彼の設計経験は、ハードウェア設計 (信号チェーン、バッテリ監視) とソフトウェア設計 (低レベルドライバ、RTOS、RF プロトコル) の両方にわたります。彼はフランスの ECE パリ大学で組込みシステム工学の修士号を取得しました

7 改訂履歴

資料番号末尾の英字は改訂を表しています。その改訂履歴は英語版に準じています。

Changes from Revision A (November 2020) to Revision B (February 2021)	Page
• ADC エネルギー計測ライブラリへのリンクを追加。.....	1

Changes from Revision * (March 2019) to Revision A (November 2020)	Page
• ドキュメント全体にわたって表、図、相互参照の採番方法を更新。.....	1
• 概要と特長に 32ksps の ADC サンプル レートのサポートを追加。.....	1
• 電気メータの計測精度テストセクションの末尾に段落を追加。.....	35
• アクティブ エネルギーの誤差 % と電流との関係、32ksps の表とグラフを追加。.....	46

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、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 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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月