

Design Guide: TIDA-011013

PCB ログスキー コイル ベースの 3 相電力量計リファレンス デザイン



説明

このリファレンス デザインは、電気メーター環境でさまざまな種類とサイズのログスキー コイルを使用できるようにすることを目標としています。このリファレンス デザインは、ソフトウェアとハードウェアの統合方法を使用して、IEC および ANSI 規格に準拠した広い電流範囲 (0.25A ~ 115A) と 0.2% の精度を実現します。このデザインは、スタンドアロンの A/D コンバータ (ADC) とプログラマブル マイコンを使用し、高い水準のフレキシビリティとカスタマイズを実現します。

リソース

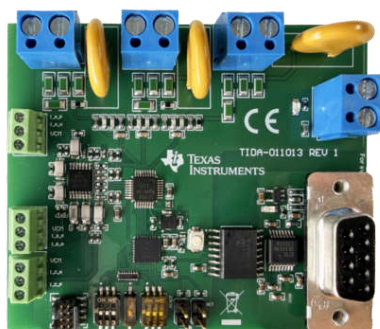
TIDA-011013	デザイン フォルダ
ADS131M08	プロダクト フォルダ
MSPM0G1506	プロダクト フォルダ
TLV4387	プロダクト フォルダ
PCB ログスキー コイル設計ツール	ツール フォルダ

特長

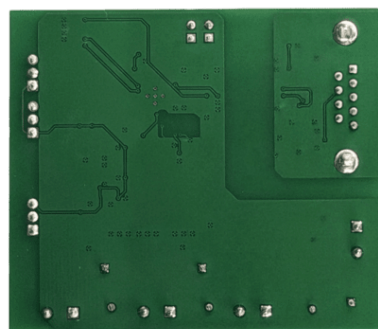
- 3 相電気メーター用のシングル チップ アンプ積分器コンディショニング回路
- ハードウェアとソフトウェアの統合方法
- 複数の測定アプリケーション向けの広い電流範囲
 - 住宅、商業、産業用

アプリケーション

- [電気メータ](#)
- [AC 充電 \(パイル\) ステーション](#)
- [AFCI サーキット ブレーカ](#)



基板上面図



基板底面図

1 システムの説明

電気メーター システムは、センサ、ADC、マイコン、電源、通信など、複数のパーツで構成されています。電気メーターの 3 つの主要な要素は、電流検出、データ アクイジション、計測エンジンです。この設計ガイドは、電気メーターの主要な構成要素やそれらの組み立て方法、さらにはリファレンス デザインの評価および使用方法についての理解を深めることを目的としています。

1.1 用語

感度 入力と出力の比

EMF 起電力

ADC A/D コンバータ

MCU マイコン ユニット

人工負荷 非抵抗性負荷

CMRR 同相信号除去比

1.2 主なシステム仕様

表 1-1. リファレンス デザインの主な詳細

項目	説明
コイル感度	16 μ V/A ~ 45 μ V/A
コイル帯域幅	10Hz ~ 40MHz (50Hz ~ 60Hz に重点)
アンプのゲイン	39 V/V
積分器帯域幅	30Hz ~ 6KHz
ソフトウェア ゲイン設定	1、2、4、8、16、32、64、128
相数	3 相
測定された電流 (AC)	0.25A ~ 115A
精度クラス	0.2% 未満
電源要件	3.3V 外部電源、j-tag

2 システム概要

ログスキー コイル電流検出は、ファラデーの電磁誘導の法則とビオ・サバールの法則という 2 つの主要な概念に依存しています。電流を流すワイヤは、空間の任意の点でその周りに磁場を発生させます。電流が交流であると仮定すると、導線内を流れる電流によって生じる磁場の変化が、閉ループの内部で起電力 (EMF) を誘起します。ログスキー コイルの出力信号は、電流そのものではなく、一次側電流の時間微分に比例する電圧 (di/dt) です。磁気コアを持たないログスキー コイルは、電気メーターなど、磁気飽和が問題となる用途において優れた選択肢となります。

ログスキー コイルの出力は電流の変化率に比例する電圧であるため、その出力電圧は一次側電流に対して 90 度位相がずれています。そのため、統合が必要です。このリファレンス デザインは、シングル チップ クワッド アンプを使用して、3 相すべてを 1 段で増幅および統合します。同一のアンプ チップ内で、ある回路を用いてすべての入力 of DC レベルを中間電圧へシフトさせることで、負電源を不要にし、システム全体のコストを低減しています。

コンディショニング後の信号は、24 ビットのデルタ シグマ同時サンプリング ADC に送られます。ADC はアナログ信号をデジタル信号に変換します。その後、データは SPI 経由でマイコンに転送され、エネルギー計測計算が行われます。電圧、電流、位相を測定してから、有効電力と無効電力を計算し、RS-232 ケーブルを介して PC の GUI に伝達します。

2.1 ブロック図

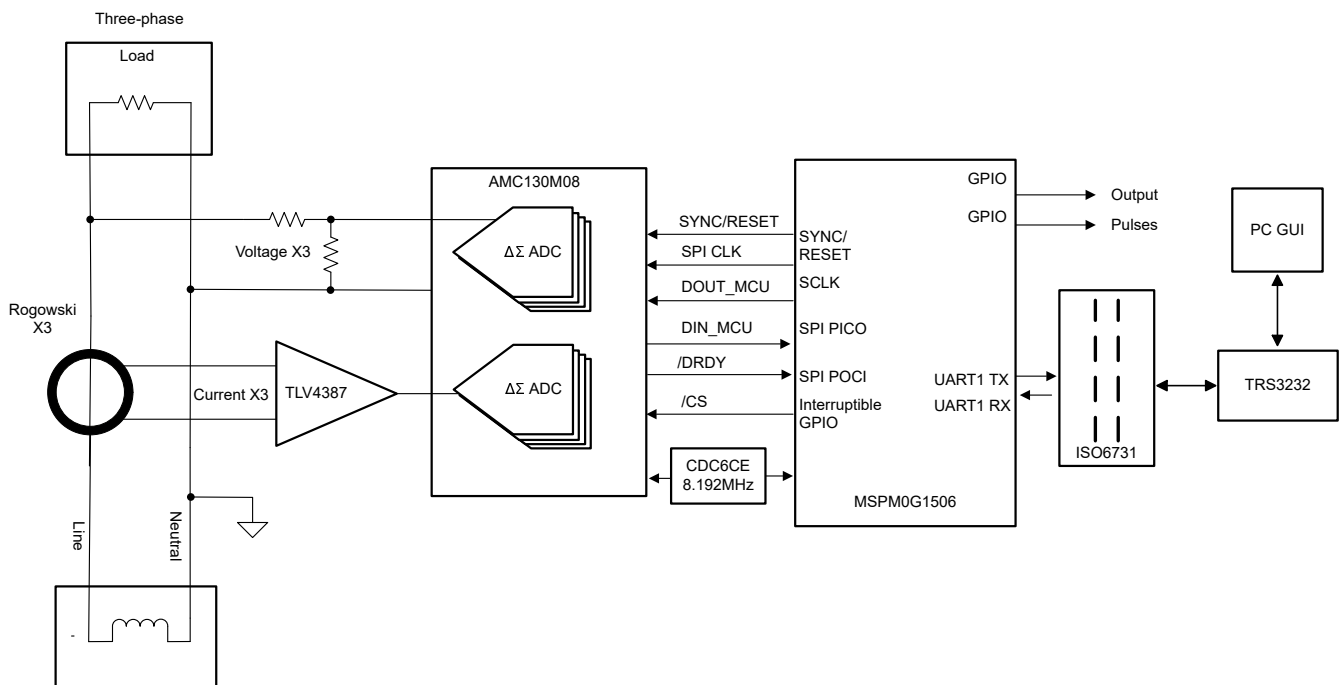


図 2-1. TIDA-011013 のブロック図

2.2 設計上の考慮事項

電気メーター内の電流検出にログスキー コイルを使用すると、設計上の課題が発生するため、注意深く対処する必要があります。この設計ガイドは、課題、設計上の検討事項、それらの課題に適切に対処する方法を説明しています。

2.2.1 低信号振幅

問題: ログスキーの出力電圧はファラデーの法則、磁束、ビオ・サバールの法則、コイル面積の複素解析から導出されます

$$V_{out} = \frac{N\mu_0 h}{2\pi} \cdot \omega I_0 \cos(\omega t) \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (1)$$

ここで:

N = 巻線数

μ_0 = 自由空間の透磁率

H = PCB の高さ

W = 角周波数

B = 外径

A = 内径

T = 時間

原因: 1 次側電流と出力電圧の比率は感度と呼ばれ、通常は $\mu\text{V/A}$ 単位で測定されます。PCB ロゴスキー コイルは、物理的な制約により、本質的に感度が低くなります。具体的には、PCB の厚さが通常わずか 1.5mm であることや、巻数が限られていることが挙げられますが、これらはいずれもコイルの感度を決定づける重要な要因です。

回避策: 信号にゲインを追加する必要があります。このリファレンス デザインのアンプは、信号に 38.9V/V を追加し、ADC PGA には 8V/V を選択しています。この組み合わせにより、感度 $16\mu\text{V/A}$ の小型ロゴスキー コイルを使用した場合、1A 未満の信号を 0.1% の精度でキャプチャすることが可能になります。

2.2.2 ノイズに対する感度

問題: 高周波ノイズが導線に混入すると、ロゴスキー コイルはそのノイズを増幅させ、出力がアンプや ADC の動作範囲のレールに達して、測定誤差が生じる可能性があります。ノイズの多い環境では、出力の振幅は、1 次側電流の実際の振幅よりも周波数の影響を受けます。

原因: ロゴスキーコイルの出力電圧は、時間の経過に伴う電流変化率 (di/dt) に正比例します。周波数が高くなると di/dt が大きくなり、感度が向上します。ロゴスキー コイルの感度は、周波数が 10 倍になるごとに 20dB の割合で増加します。

回避方法: この特性を補償するには、ロゴスキー コイルの周波数特性 (-20dB/dec) とは逆の特性を持つように積分器を設計する必要があります。ロゴスキー コイルの出力は、実際の電流振幅に関係なく周波数とともに増大するため、-20dB/dec の応答を持つ積分器を設計するとこの影響をキャンセルします。合成周波数特性は帯域全体にわたって平坦となり、出力が周波数ではなく実際の電流振幅に依存する状態が維持されます。

2.2.3 積分器の制限

課題: 電気計測 (50Hz ~ 60Hz) において、低周波数での積分処理を行うには、長い期間にわたって信号を積算する必要があり、そのため不安定性や信号の変化、低周波ノイズの影響を受けやすくなります。さらに、周波数がゼロ (DC) に近づくにつれて積分器のゲインは無限大に近づくため、シグナル チェーンに混入した低周波ノイズが増幅され、不安定性を引き起こします。

原因:

ハードウェア統合の複雑性: 低周波数帯域でハードウェア積分器を実装することは、部品に関する要件 (特に部品サイズ) の面から非常に困難です。低周波数では大きな部品値が必要となるためです ($\tan^{-1}(wRC) = 90, z = \frac{1}{jwc}$)。C と R を得るには、M Ω と μF の値にする必要があります。

回避方法: 最適な統合を実現するには、C0G/NP0 コンデンサ、低公差の整合抵抗、低ノイズ ゼロドリフト アンプを使用する必要があります。

2.2.4 人工負荷の影響

問題: 家電製品や家庭用デバイスが積極的に電力を消費している実際の測定シナリオでは、電流波形がクリーンな正弦波になることはほとんどありません。さまざまな負荷が原因で歪みが発生し、高周波成分が波形に重ね合わされます。

原因: 電磁干渉特性や過渡バーストを示す IH クッキングヒーター、洗濯機、乾燥機、ファン、照明などの荷重

回避方法: 信号を増幅する前に、高電圧スパイクと非抵抗性負荷の影響をフィルタリングする積分器が必要です。

2.2.5 浮遊磁場干渉

問題: ロゴスキーは di/dt の電流センサであるため、時間の経過に伴う磁束の変化を検出します。メーターの近くに浮遊磁場が存在すると、メーターがその磁場を拾い、不正確な請求の原因となります。

原因: ロゴスキー コイルが浮遊磁場の影響を受けやすい主な理由は、それらが磁束の時間変化率を検出する空芯センサであり、外部磁場を遮断するための高透磁率シールド コアを備えていないためです。

回避方法: これに対処するには、インターリーブ リターン ループを備えた差動コイルが必要です。外部磁場にさらされると、この構成によって同相信号が生成され、その後差動アンプによってキャンセルされます。このリファレンス デザインでは、差動アンプの実装について詳細に説明します。

2.2.6 クロストーク

問題: クロストークは、センシング コイルを電流搬送配線の近くに配置するとき、または 3 相システムでロゴスキー コイルを使用するとき発生します。この干渉は、隣接する位相によって生成される外部磁場の影響による電流測定的不正確さにつながります。

原因: ビオ・サバルの法則は、直線の電流を搬送するワイヤがワイヤの中心から離れた場所で生成する磁場を計算するための法則です

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1 \sin(wt)}{2\pi r_1} \quad (2)$$

B_1 は、ワイヤの中心からの任意の点距離 (r_1) でワイヤ 1 によって生成される磁場です。

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2 \sin(wt)}{2\pi r_2} \quad (3)$$

B_2 は、ワイヤの中心からの任意の点距離 (r_2) でワイヤ 2 によって生成される磁場です。

ワイヤ間の任意の点の磁場の合計は次のとおりです。

$$\Sigma B = B_1(r_1) + B_2(r_2)\cos(\theta) \quad (4)$$

(θ) は、 B_1 と B_2 の間の方向であり、(θ) は 2 本のワイヤが互いに平行である場合にのみ 180 または 0 になります。

- – (θ) = 180° の場合、電流は同じ方向に流れ、磁場は互いに逆向きになります。距離がどちらかのワイヤに近づくとも磁場の合計が増加し、電流が同じ場合は 2 本のワイヤ間の midpoint でキャンセルされます。
- (θ) = 0° の場合、電流は逆方向に流れ、磁場は同じ方向に互いに補強され、ワイヤ間に均一なネット磁場が生成されます。ワイヤ間の間隔が減少すると、全体的な磁場の大きさが増加し、間隔が増加するにつれて減少します。
- これらは 2 つのワーストケースであり、非現実的です。クロストークの影響は、2 つのワーストケースの間の任意の時点で発生する可能性があります。

回避方法:

1. これに対処するには、インターリーブ リターン ループを備えた差動コイルが必要です。外部磁場にさらされると、この構成によって同相信号が生成され、その後差動アンプによってキャンセルされます。このリファレンス デザインでは、差動アンプの実装について詳細に説明します。
2. ソフトウェアのキャリブレーションとクロストーク補償。

2.2.7 機械的限界

問題:

- コイル形状: スペースを無駄にせずにバスバーの周囲に効率的に適合させるには、多くの場合、円形でないコイルの形状が必要になります。
- リモート配置: 一部のアプリケーションでは、センシング素子を計測回路またはシグナル コンディショニング回路から離して配置する必要があります。
- 後付けに関する不便さ: ワイヤまたはハーネスがすでに取り付けられている場合、PCB ログスキー コイルを取り付ける作業は中断が生じ、実用的ではない可能性があります。

原因:

- PCB ログスキー コイルは本質的に、計測ボードへの接続に沿ってノイズを拾いやすい傾向にあります。このノイズは、測定精度を低下させる可能性があります。

- 堅固な固定コイル形状により、導体またはバスバーを包むために既存の設置場所の物理的な変更や中断が必要になるため、取り付けが困難になります。

回避方法:

- 導体やバスバーに容易に巻き付けられる柔軟性あるコイル設計または開閉可能なコイル設計は、より実用的で、設置の際の負担の少ない代替手段となります。
- センシング コイルの近くにシグナル コンディショニングを配置します。

2.2.8 人為的ミス

問題:

- 出力電圧の最適化: 出力電圧を最大化するには、コイルの巻線数を増やして実効表面積を大きくする必要があります。しかし、手動で行う場合は、性能を維持しながら回転数をスケールアップするのは簡単ではありません。
- ループ対称: センシング ループの厳密な対称性を維持することは、PCB ロゴスキー コイルの設計で最も困難な要素の 1 つです。幾何学的な不一致が小さい場合でも不均衡が発生し、波形の歪みや、外部の磁場結合に対する感受性が高くなる可能性があります。
- 閉ループの整合性: 意図した差動アーキテクチャを維持するには、すべてのコイルの巻線が対称的に維持され、適切に閉ループを形成することが重要です。特に複雑な形状や非標準形状で、手作業でこのレベルの精度を達成することは非常に困難であり、エラーが発生しやすくなります。

原因: ロゴスキー コイルは、基本的には非磁性体の芯に導線を巻き付け、その一端を中心部を通して戻すことで帰路を形成する構造になっています。アセンブリ全体が閉ループ状に成形され、その設計内には 2 種類の異なるループが生じます。

- センシング ループ
- リターン ループ

出力電圧は巻線数とコイルの形状に直接依存するため、手動構成時に発生する非対称性や不整合は、測定精度とノイズ耐性に直接的な影響を及ぼします。

回避方法: [PCB ロゴスキー コイル設計ツール](#)を使用すると、コイル設計プロセスを自動化できます。

2.3 主な使用製品

2.3.1 TLV4387

TLV4387 は、最先端の性能を実現する高精度アンプです。TLVx387 は、ゼロドリフト テクノロジーにより、オフセット電圧およびオフセットドリフトについて比類のない長期安定性を実現します。TLVx387 は、わずか 570 μ A の消費電流で、5.7MHz の帯域幅、8.5nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の広帯域ノイズ、177nVPP の 1/f ノイズを実現します。これらの仕様は、16 ビット ~ 24 ビットの A/D コンバータ (ADC) で、非常に高い精度を実現するとともに、直線性の低下を避けるために重要なものです。TLV4387 は、全温度範囲にわたってバイアス電流がフラットです。したがって、高入力インピーダンス アプリケーションに使用する場合、全温度範囲にわたってキャリブレーションは不要、またはごくわずかで済みます。

2.3.2 ADS131M08

ADS131M08 は、8 チャンネルの同時サンプリング、24 ビット、デルタ シグマ ($\Delta\Sigma$) A/D コンバータ (ADC) です。広いダイナミックレンジ、低消費電力、エネルギー測定固有の機能を備えているため、エネルギー測定、電力測定、サーキットブレーカの用途に非常に適しています。ADC 入力を、抵抗デバインド回路または変圧器に直接接続して電圧を測定でき、変流器またはロゴスキー コイルに接続して電流を測定できます。個々の ADC チャンネルは、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増幅できます。さらに、このデバイスにはチャンネル間位相較正レジスタ、オフセットおよびゲイン較正レジスタが内蔵されており、信号チェーンの誤差を除去するのに役立ちます。本デバイスのリファレンス電圧は 1.2V、低ドリフトなので、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 マップでの任意の巡回冗長性検査 (CRC) は通信の整合性を維持します。

2.3.3 MSPM0G1506

TI MSPM0G1506 は、アナログ機能とデジタル機能の統合レベルが異なるデバイスで構成される低消費電力マイコンであり、顧客はプロジェクトの要件に合致するマイコンを選択することができます。MSPM0G1506 は、包括的な超低消費電

カシステム アーキテクチャを備えた Arm Cortex-M0+ プラットフォームを搭載しており、システム設計者は消費電力を抑えつつ性能を向上させることができます。

2.3.4 **ISO6731**

ISO6761 デバイスは、UL 1577 に基づく最大 5000VRMS の絶縁定格を必要とし、かつコストが重視されるアプリケーションに適した高性能 6 チャンネル デジタル アイソレータです。これらのデバイスは VDE、TUV、CSA、CQC の認定も受けています。ISO676x デバイスは、CMOS または LVCMOS 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。各絶縁チャンネルは、TI の二酸化ケイ素 (SiO₂) の二重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。

2.3.5 **TPS70933**

TPS709 シリーズのリニアレギュレータは、消費電力が重要なアプリケーション用に設計された、静止電流が非常に低いデバイスです。

2.3.6 **TRS3232**

TRS3232 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 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氣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 つの小さな外部コンデンサにより、3V ~ 5.5V の単一電源で動作できます。このデバイスは最大 250kbps のデータ信号速度、最大 30V/μs のドライバ出力スlewレートで動作します。

2.3.7 **CDC6CE**

CDC6Cx デバイスは、共振源として BAW を組み込んだ低ジッタで低消費電力の固定周波数発振器です。このデバイスは、特定の周波数および機能ピンに合わせて工場出荷時にプログラム済みです。CDC6CE には周波数制御ロジックと出力周波数分周器が搭載されており、規定された範囲内で任意の周波数を生成できるため、1 つのデバイスファミリで、あらゆる周波数のニーズに対応可能です。このデバイスは高性能のクロックを供給し、機械的な安定性があり、低消費電力で柔軟性が高く、小型パッケージのオプションもあり、産業用、テレコム、データ、およびエンタープライズ ネットワークやパーソナル エレクトロニクスの最終製品のリファレンスクロックやコアクロックに適しています。

3 システム設計理論

このリファレンス デザインは、TI の最新の PCB ログスキー設計ツールを採用しています。この新しい設計ツールは PCB コイルの形状の課題に対応します。たとえば、トレース配置による非対称性、ループのミスマッチ、マニュアル コイル設計による人為的ミスなどです。TI の各種デバイスは、統合、コイルの低感度、クロストーク、外部磁場の影響、ノイズに対する感度というログスキー設計の課題を解決します。

3.1 ログスキーコイル

このコイルは、対応するリターン ループを備えた差動コイルとして機能します。導体からの距離は、磁場密度とループ面積を制御することで、ログスキーの感度を決定します。高ゲインのこの差動信号では、ループ経路の不一致が生じると、外部磁場が信号に結合します。このコイル設計は、新しいレイアウトを使用してループ パスをマッチングさせ、内部のビアをオフセットします。その結果、ループ密度が向上します。4 つのインターリーブされたログスキー コイルで、この設計を実現します。外側コイルと内側コイルの 2 つのコイルは、互いに逆方向に巻かれ、直列に接続されます。これらは、同一方向に巻かれたもう一方のペアと差動接続されます。このトポロジは、誘導性と静電容量性のノイズ除去を実現すると同時に、コイル密度を向上させます。ログスキー コイル設計ツールは、センタータップ付きの PCB コイルに対応しています。これにより、信号を同相電圧にバイアスすることが可能となり、負電源が不要になるため、システム全体のコストを低減できます。

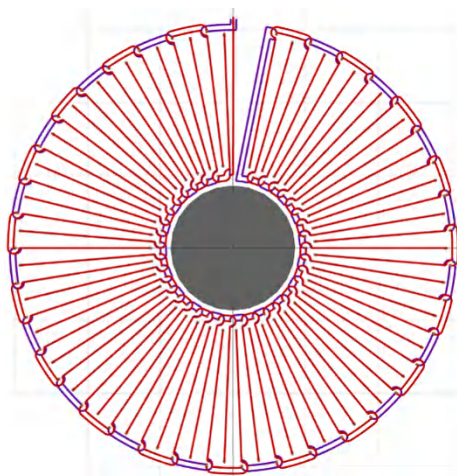


図 3-1. ログスキー コイル巻線のレイアウト

3.2 ハードウェア積分器

積分器は DC でのゲインが無限であるため、時間の経過に伴って誤差を増大させることなく、PCB ログスキーの帯域幅全体にわたってフラットな応答を行います。

差動積分回路は、PCB ログスキー設計上の課題に対処し、広い電流範囲にわたって ANSI と IEC 規格に従い、クラス 0.2 の精度を達成できるように設計されています。

TLV4387 は、優れた低ノイズ ゼロドリフト アンプであることに加え、外部磁場によって生じる同相信号を除去できる高い CMRR を備えているため、このアプリケーションに選択されました。

TLV4387 の 3 つの回路を使用して各ログスキー出力信号を 3 相システムでコンディショニングし、4 つ目の回路を使用して同相電圧を生成します。ADC 入力は疑似差動で駆動されるため、同相バイアスからのノイズは除去されます。

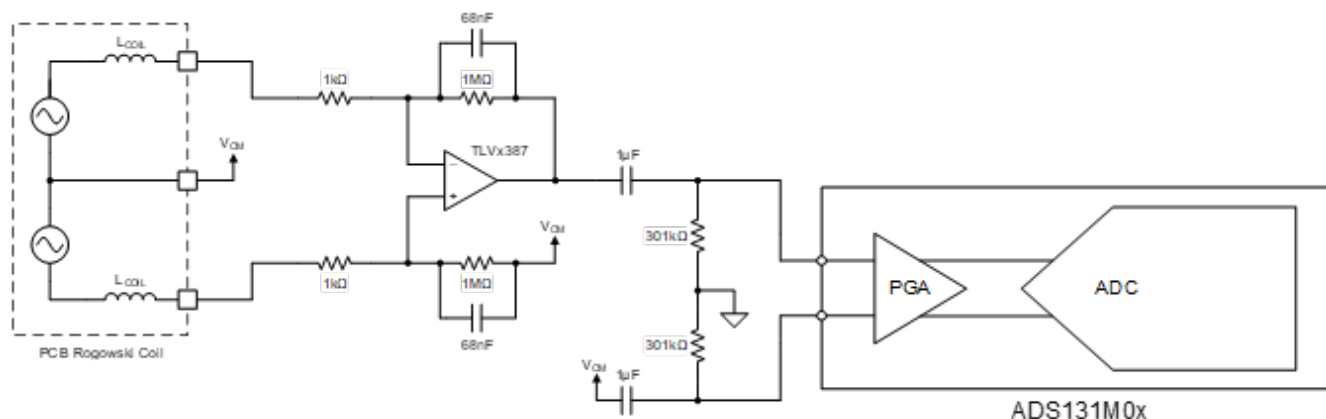


図 3-2. 差動積分アンプ回路

4 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、およびテスト結果

4.1 ハードウェア要件

このリファレンス デザインの適切なシステム動作および性能を確保するために、以下のハードウェア コンポーネントおよび仕様が必要です:

1. 3.3VDC 外部電源
2. RS-232 ケーブル
3. 高電圧用安全ボックス
4. マイナスドライバ
5. 3×電流用 1AWG ワイヤ
6. 4×電圧用 14AWG - 10AWG ワイヤ
7. 高精度 AC 電源
8. AC 負荷
9. 3×トリプレックス (ツイストペア) (コイルレーボード間接続)

4.2 ソフトウェア

このリファレンス デザインの適切なシステム動作および性能を実現するには、以下のソフトウェア部品と仕様が必要です。

1. RS-232 - USB 変換ドライバ
2. Metrology GUI
3. MSPM0SDK

注: 計測コードはすでにリファレンス デザインにフラッシュ書き込み済みです。

4.3 テスト設定

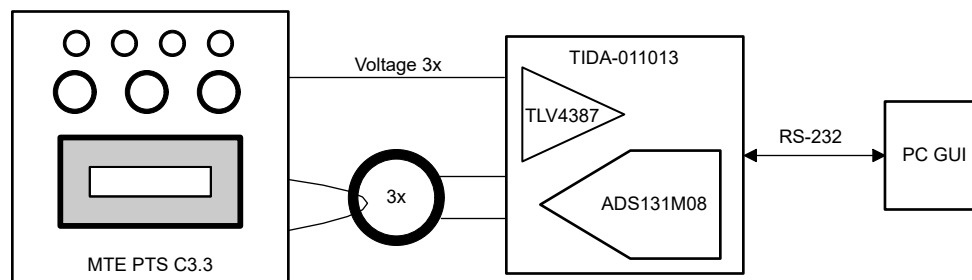


図 4-1. テスト設定のブロック図

4.3.1 ヘッダー情報

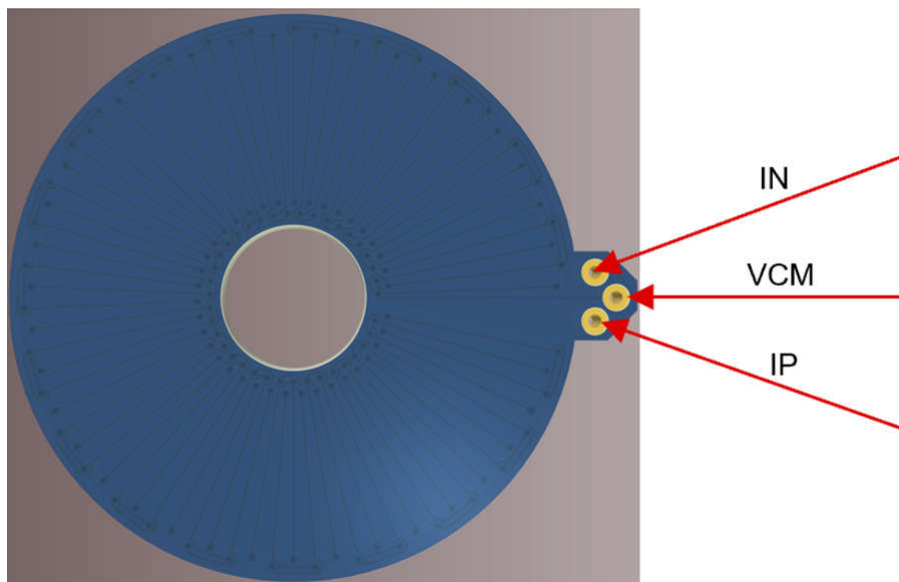


図 4-2. ログスキー コイル接続ガイド

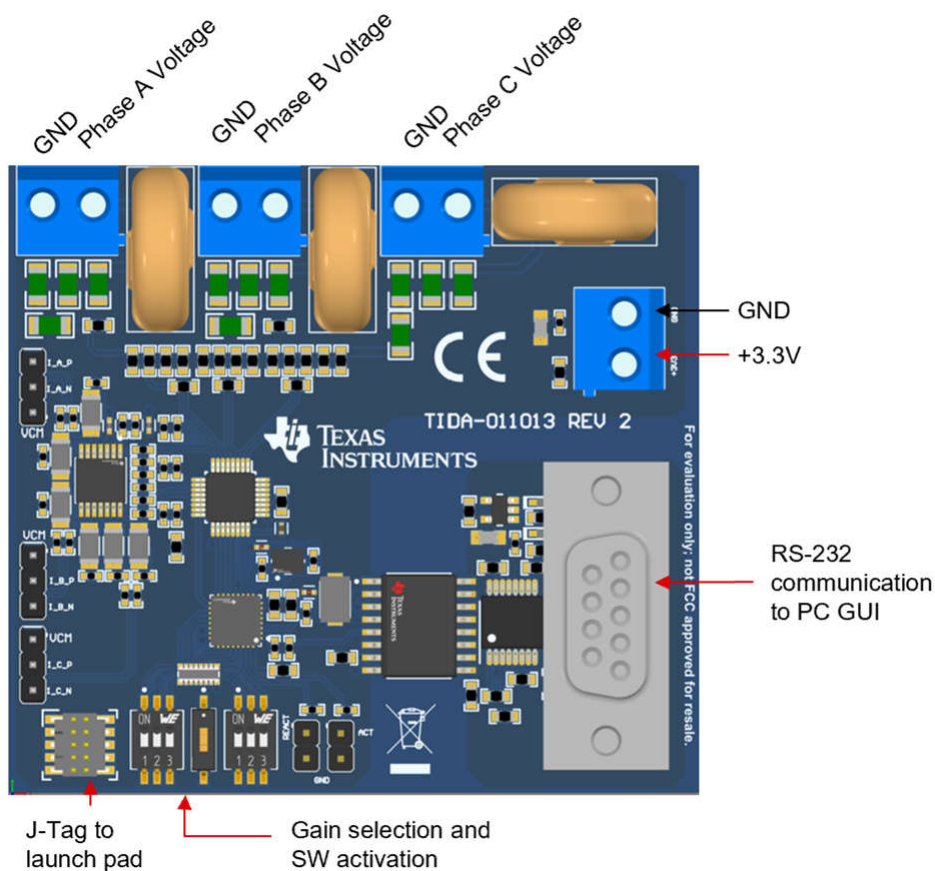


図 4-3. TIDA-011013 接続ガイド

4.4 はじめに

4.4.1 ソフトウェアのインストール

リファレンス デザインの評価に使用する PC には、2 つのソフトウェアをインストールする必要があります。まず、RS-232 ケーブルのドライバをメーカーのウェブサイトからインストールする必要があります。2 番目に必要なソフトウェアは **MSPM0-SDK** です。SDK パッケージにはエネルギー計測 GUI が含まれています。

4.4.2 GUI 設定

GUI を実行する前に、USB - RS-232 変換ケーブルを PC に接続し、使用する COM ポートを確認します。Microsoft Windows PC では、デバイス マネージャーを開き、下にポート (COM および LPT) までスクロールします。さまざまな USB シリアル COM ポートを見つけ、使用したポートを書き留めます。

計測 GUI が含まれている PC 上のフォルダを開きます。デフォルトでは、GUI は「C:\ti\mspm0_sdk_(version)\tools\metrology_gui」にあります。ファイル「calibrator.exe」を実行する前に、ファイル「calibration-config.xml」を開いて編集します。テキストエディタで、ファイル「calibration-config.XML」を開いて検索します。メーター位置に続く線は、PL2303GS COM ポートに関連付けられているのと同じ COM ポートを使用する必要があります。ファイル「calibrator.exe」を実行する前に、変更内容を保存します。

GUI のセットアップが完了したら、「calibrator.exe」を開きます。

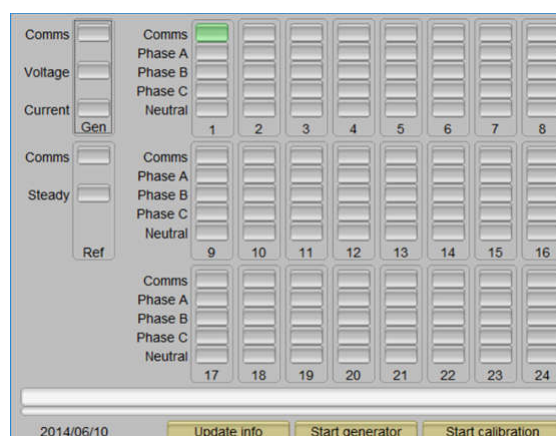


図 4-4. GUI スタートアップ ページ

「calibrator.exe」をクリックすると、GUI スタートアップ ページが表示されるので、緑色のボタンをクリックして、メーターの測定値とキャリブレーションにアクセスします。ボタンが赤色の場合、TIDA-011013 と PC GUI との接続が確立されていないことを意味します。接続をデバッグするには、COM ポート (デバイス マネージャーに表示されているもの) とボーレート (9600) が正しい構成に設定されていることを確認してから、再接続を試みてください。

接続したら、緑色のボタンをクリックして、メーターの読み取り値とキャリブレーションにアクセスします。



図 4-5. メーターの読み取り値とキャリブレーション

4.4.2.1 キャリブレーション

GUI が起動して更新が開始されると、メーターはキャリブレーション可能な状態になります

注

キャリブレーションの前に、オンボードの DIP スイッチを使用して PGA ゲインが 8 (最大電流 120、コイル感度 25 μ V/A 以下) に設定されていることを確認してください。最大電流に応じてゲインを調整します。ゲインを変更するたびに、リセット ボタンをクリックして設定をリセットする必要があります。

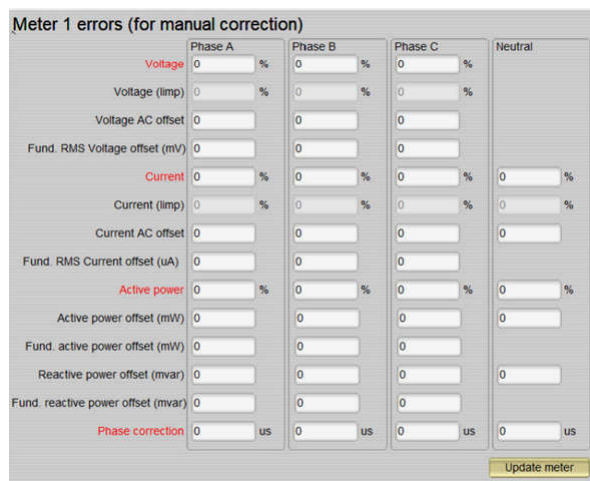


図 4-6. 手動キャリブレーション ページ

キャリブレーションは公称値で行うことを推奨します。

- 120Vrms
- 15Arms
- 50Hz ~ 60Hz
- 60° 位相オフセット

メーターに公称値を入力します。図 4-6 に示されている GUI の手動キャリブレーション タブを開きます。まず、各相の位相補正セルにマイクロ秒を加算または減算して、位相を校正します。

$$\frac{60 - (\text{measured phase offset})}{360} \quad (5)$$

位相が校正されたら、位相 $V \rightarrow I$ を 0° に変更し、電圧、電流、有効電力を校正します。誤り訂正係数は、次の式を使って計算します。

$$\left(\left(\frac{\text{measuredvalue}}{\text{sourcevalue}} \right) - 1 \right) \cdot 100 \quad (6)$$

各位相の手動キャリブレーション タブ (赤いセル) に補正係数をコピーし、更新メーターをクリックします。これで、メーターのキャリブレーションが完了し、評価とテストの準備が整います。

4.5 テスト結果

- 試験に使用した PCB ロゴスキー コイルは、感度 $20\mu\text{V/A}$ のロゴスキー設計ツールを用いて製作されたものです。
- TIDA-011013 は、クラス 100m (最小電流 1A、最大電流 100) で 0.1 ~ 0.2 クラスの精度を想定しています。
- 0.25A ~ 115A の電流で精度測定を行っています

4.5.1 有効電力精度測定

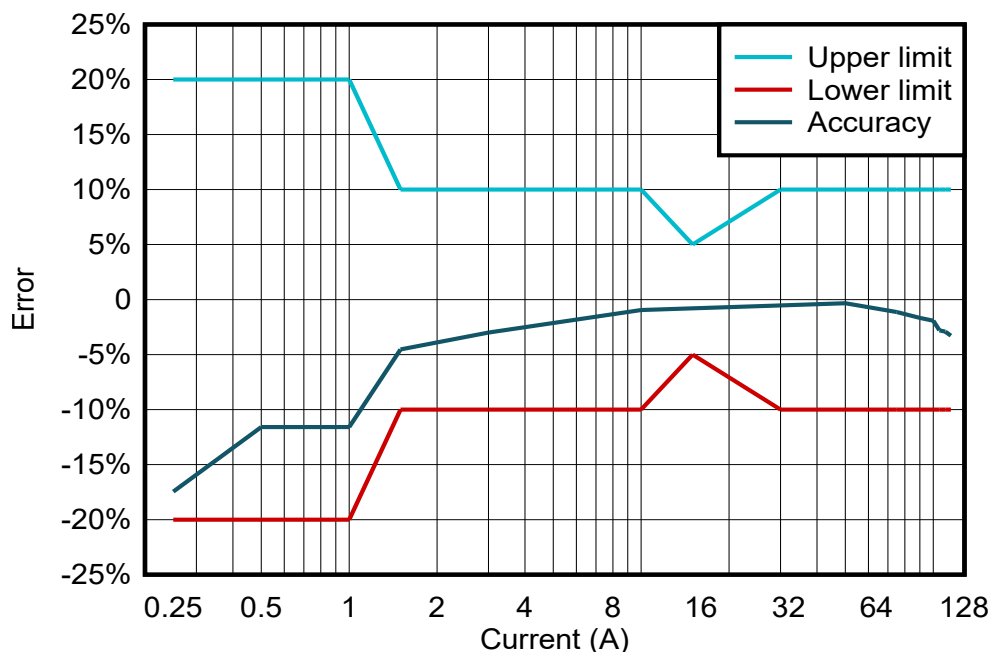


図 4-7. 全電流範囲での有効電力精度測定 PF = 1

観察所見: TIDA-011013 は、全電流範囲および電流範囲外で 0.1 クラスの精度を達成しました。

4.5.2 有効電力精度測定 (PF≠1)

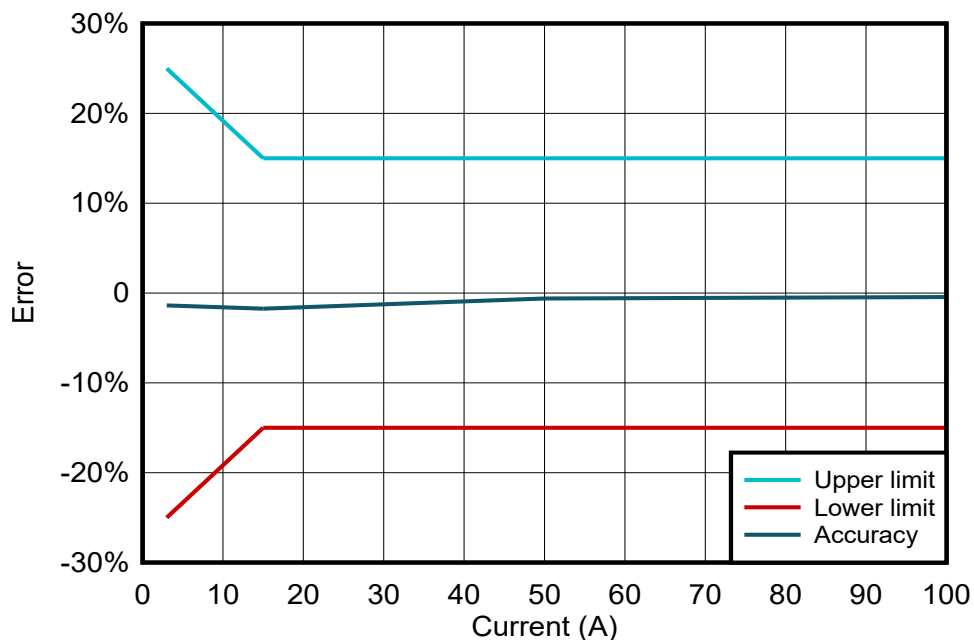


図 4-8. 全電流範囲での有効電力精度測定 PF = 0.5 (進み)

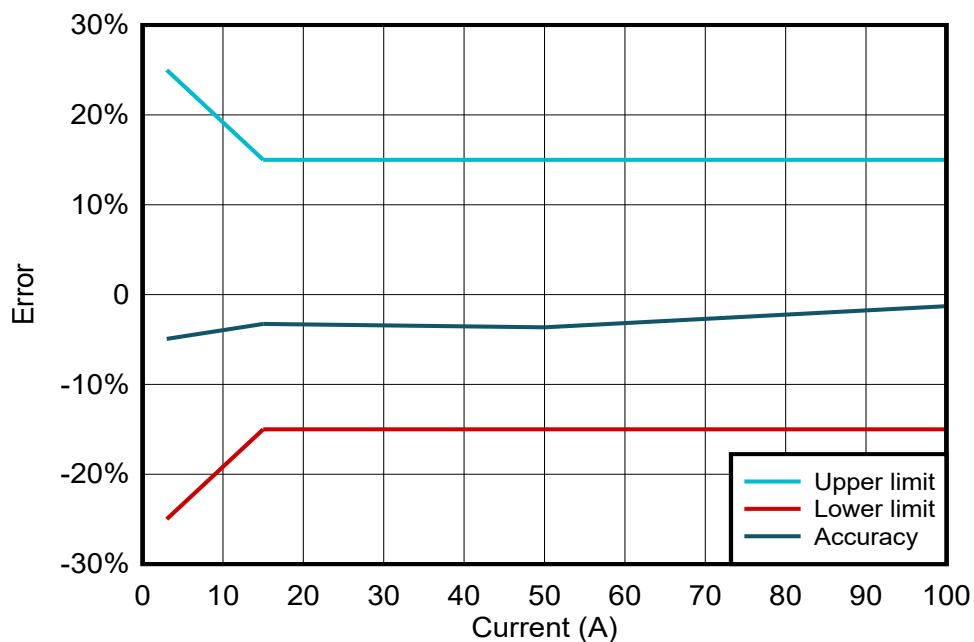


図 4-9. 全電流範囲での有効電力精度測定 PF = 0.5 (遅れ)

観察所見: TIDA-011013 は、全電流範囲で 0.1 クラスの精度を達成しました。

4.5.3 無効電力精度測定

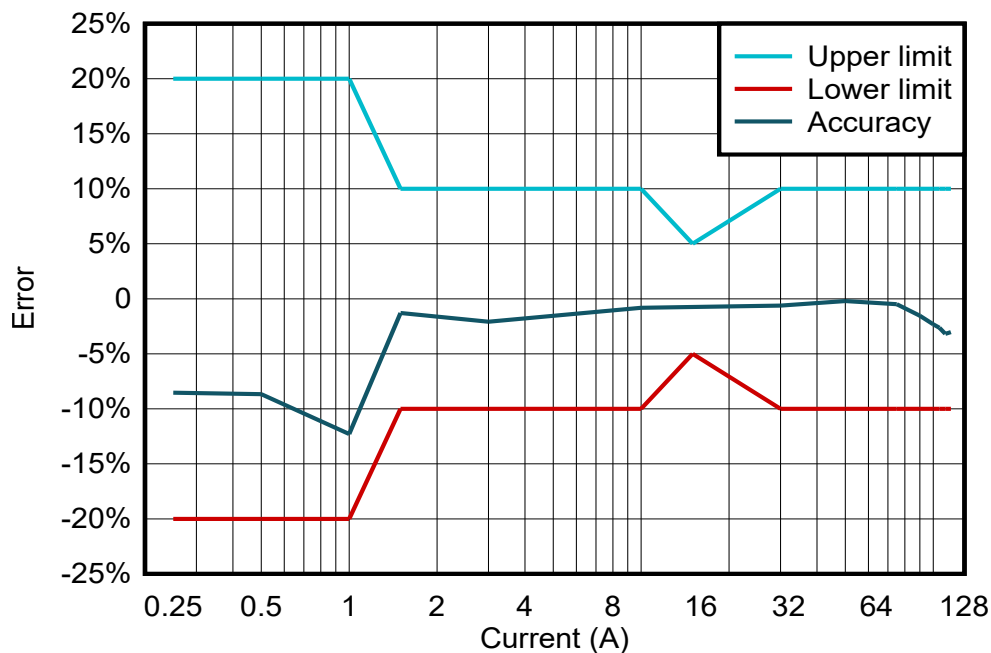


図 4-10. 全電流範囲での無効電力精度測定 PF=1

観察所見: TIDA-011013 は、全電流範囲および電流範囲外で 0.1 クラスの精度を達成しました。

4.5.4 無効電力精度測定 (PF≠1)

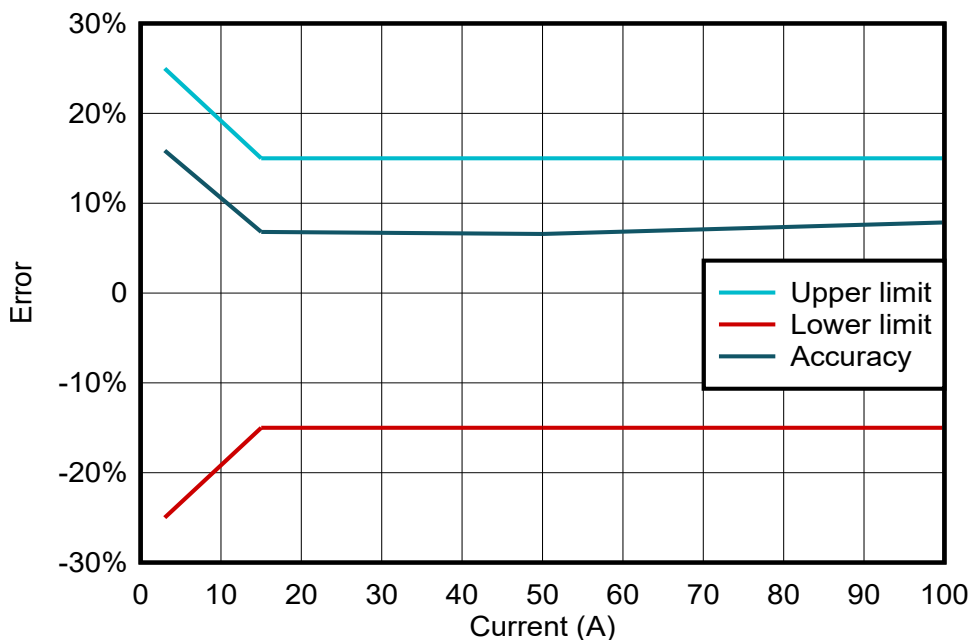


図 4-11. 全電流範囲での有効電力精度測定 PF = 0.5 (進み)

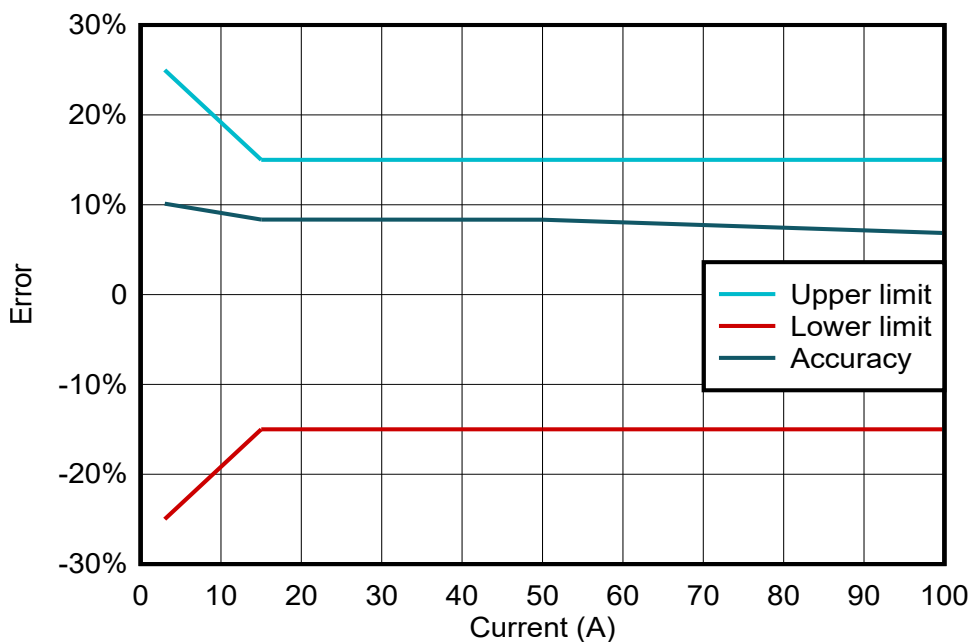


図 4-12. 全電流範囲での有効電力精度測定 PF = 0.5 (遅れ)

観察所見: TIDA-011013 は、全電流範囲で 0.1 クラスの精度を達成しました。

4.5.5 電圧変動精度測定

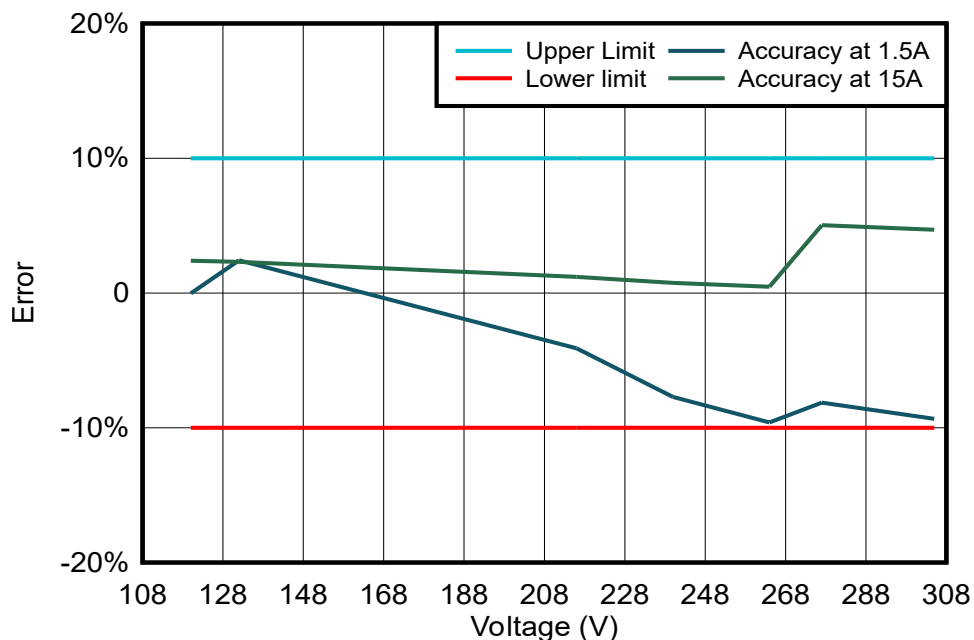


図 4-13. 異なる電流レベルにおける電圧精度測定の変動

4.5.6 周波数変動精度測定

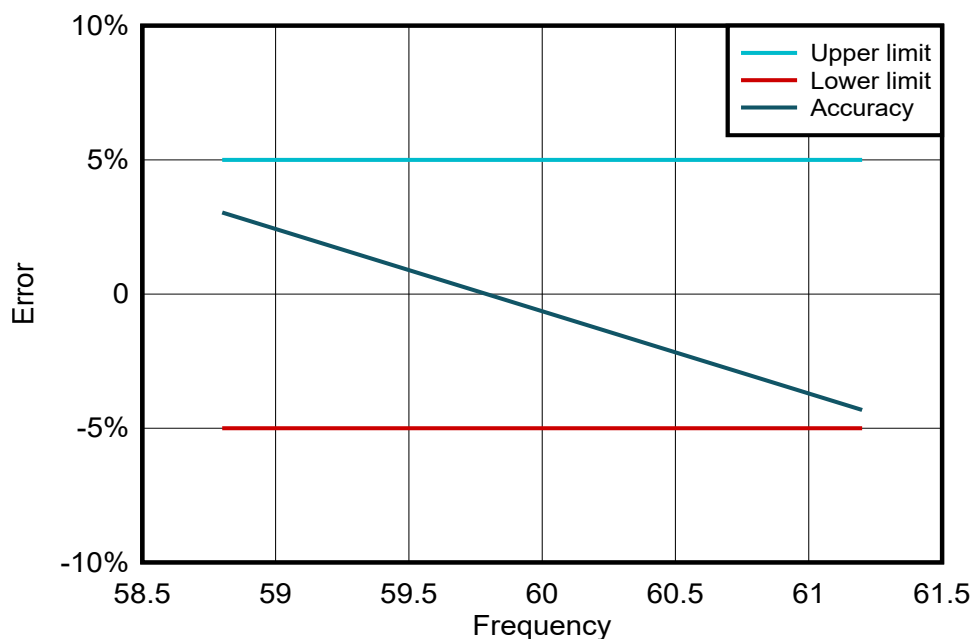


図 4-14. 基準周波数の±2% での周波数精度の変動

観察所見: TIDA-011013 は、全周波数範囲で 0.1 クラスの精度を達成しました。

4.5.7 電流回路測定精度における同等性

目的: 3 相すべてを接続した状態 (リファレンス) でリファレンス デザインの精度を検証し、その後 1 相を除くすべての相を取り外し、各相を個別に接続した状態で精度を測定および記録します。

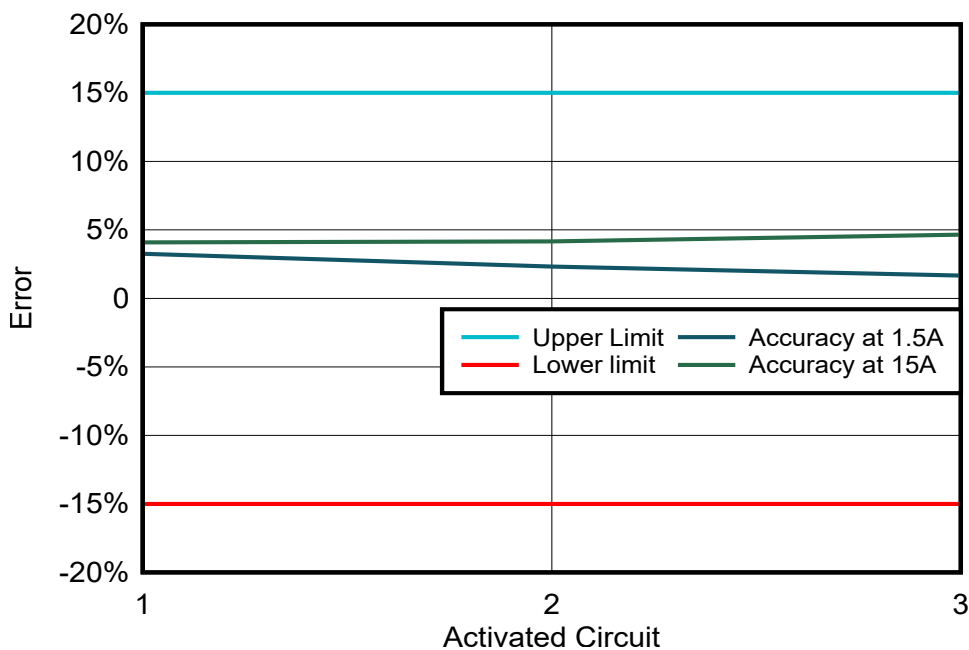


図 4-15. 電流回路測定精度における同等性

観察所見: TIDA-011013 では、一度に 1 つの回路のみを異なる電流レベルでアクティブにすることで、0.1 クラスの精度を実現しました。

4.5.8 位相反転精度測定

目的: 3 相すべてを接続した状態でリファレンス デザインの精度を検証し (リファレンス)、相順を入れ替え (ABC から CBA へ)、入れ替え後の精度を記録して、それぞれの精度を比較します。精度の偏差が 0.1 クラスの精度制限を超えないようにしてください。

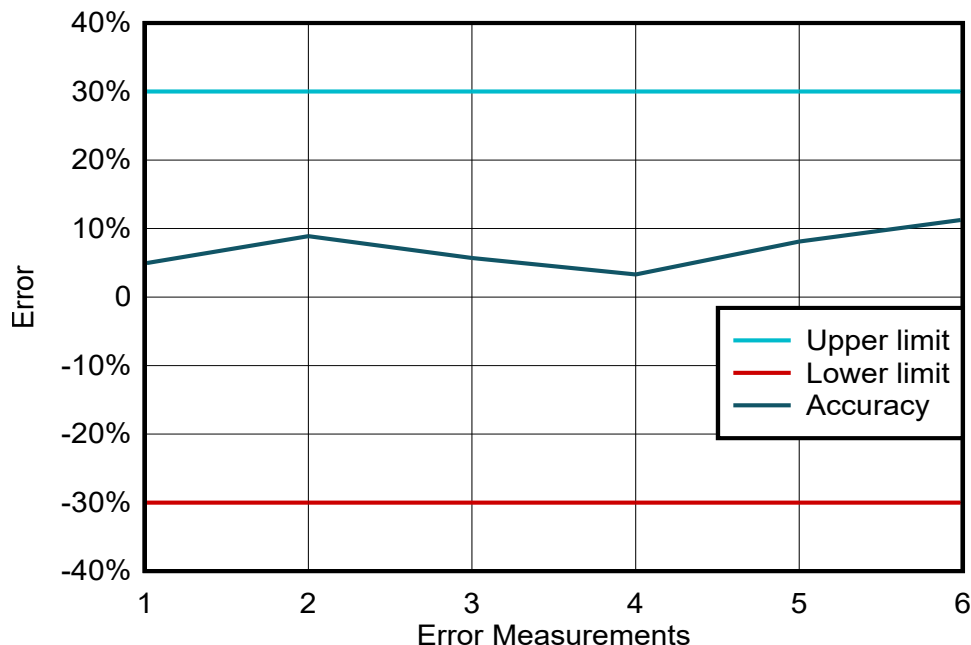


図 4-16. 電流回路測定精度における同等性

観察所見: 30 分間に 6 つの異なる精度測定値を取得しました (各エラー値の間隔は 5 分間)。TIDA-011013 は、位相のシーケンスが反転しても、0.1 クラスの精度を実現しました。

4.5.9 温度変動精度測定

目的: リファレンス デザインの精度を記録し、温度制御されたチャンバー内に設置して温度を -20°C に変更し、1 時間待機した後、誤差測定値を記録します。温度 50°C についても同じプロセスを繰り返し、誤差測定値を記録します。

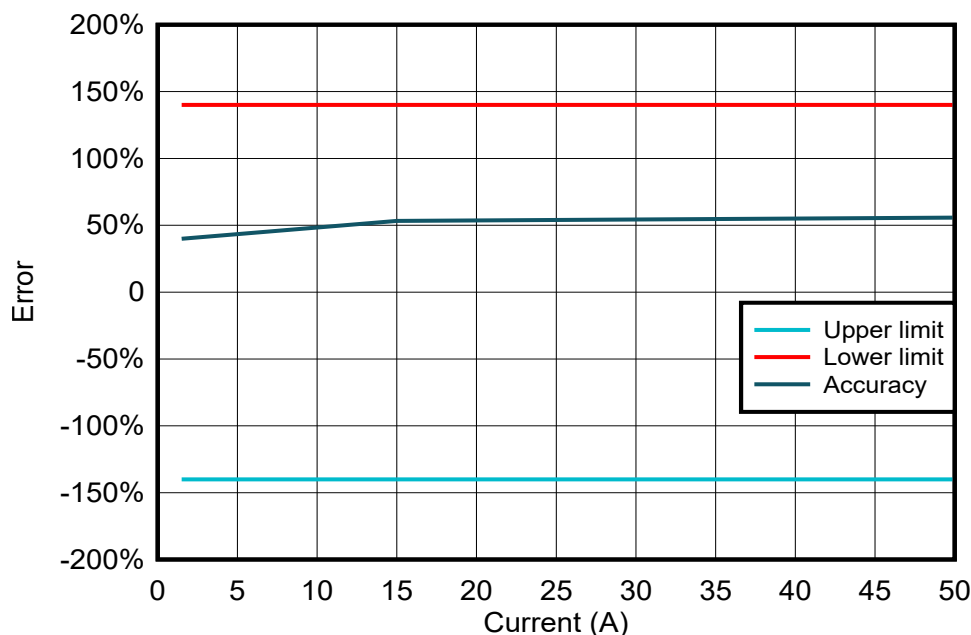


図 4-17. 50°C での精度測定

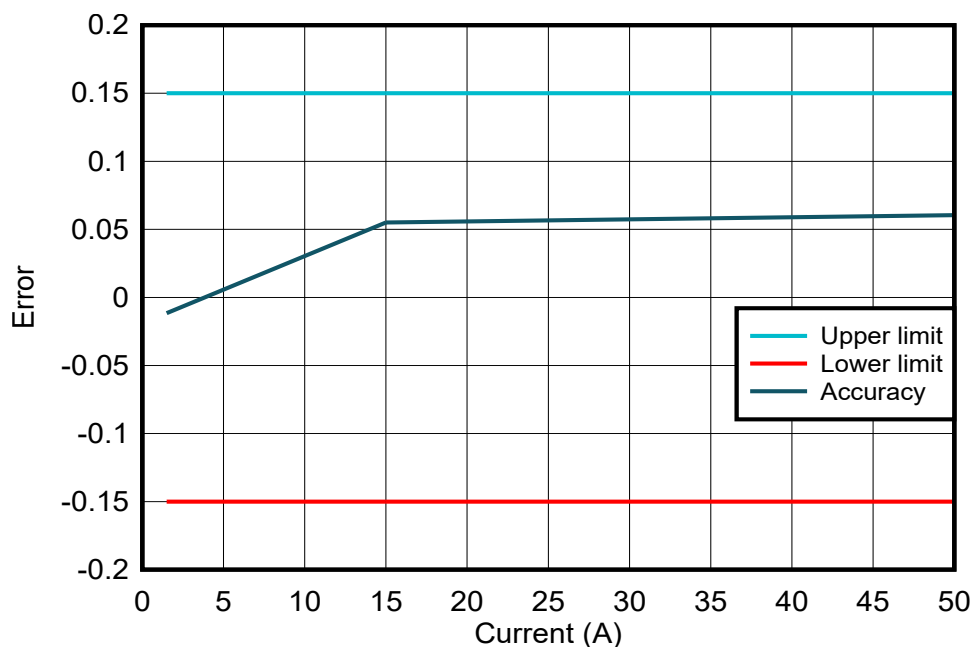


図 4-18. -20°C での精度測定

観察所見: TIDA-011013 は、広い温度範囲で 0.1 クラスの精度を達成しました。

4.5.10 クロストーク精度測定

目的: 各相を個別に較正します。まず位相 1 に 20A を印加してその測定電流を記録し、次に位相 2 に 180° の位相差 (ワーストケース) を設けて 100A を印加し、位相 1 へのクロストークの影響を観測します。位相 2 と位相 3 についても、この手順を繰り返します。クロストークの影響は、許容制限値以下に維持する必要があります。

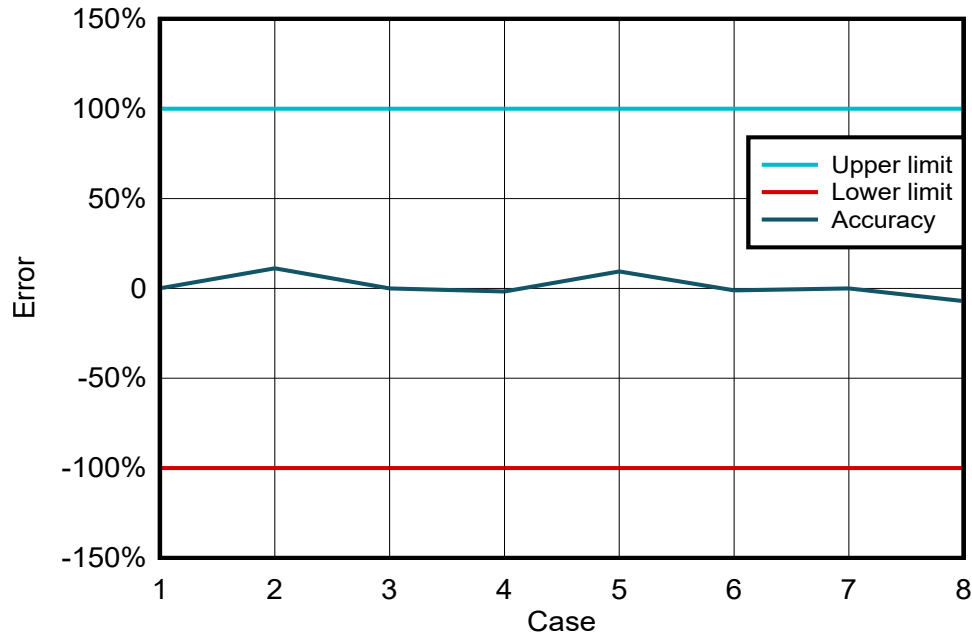


図 4-19. TIDA-011013 クロストーク耐性

観察所見: x 軸は、TIDA-011013 のテストが行われた各ケースを表しています。ケースを以下の表に示します。TIDA-011013 は、あらゆるケースにおいて、隣接する位相によって発生する外部磁場の影響下でも許容誤差の範囲内に収まりました。

表 4-1. クロストーク テスト ケース

ケース	I1	I2	I3
1	20A	0	0
2	20A	100A	0
3	0	20A	0
4	100A	20A	0
5	0	20A	100A
6	100A	20A	100A
7	0	0	20A
8	0	100A	20A

4.5.11 外部磁場精度測定の影響

目的: 外部磁界が存在しない環境でリファレンス デザインを校正します。次に、直径 1m の円形ワイヤにリファレンス デザインを配置して 60A/巻線の電流を流し、誤差の測定値と基準となる測定値を比較することで、外部磁界の影響を記録します。

セットアップ: このテストでは、外部磁場を生成するためにヘルムホルツ コイルを使用しています。図 4-20 を参照してください。

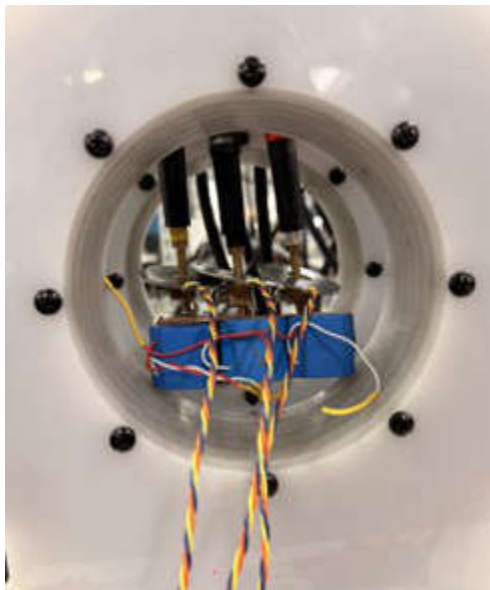


図 4-20. ヘルムホルツ コイルの内側の PCB ロゴスキー コイル

ヘルムホルツ コイルによって生成される磁場 = 0.5mT

結果:

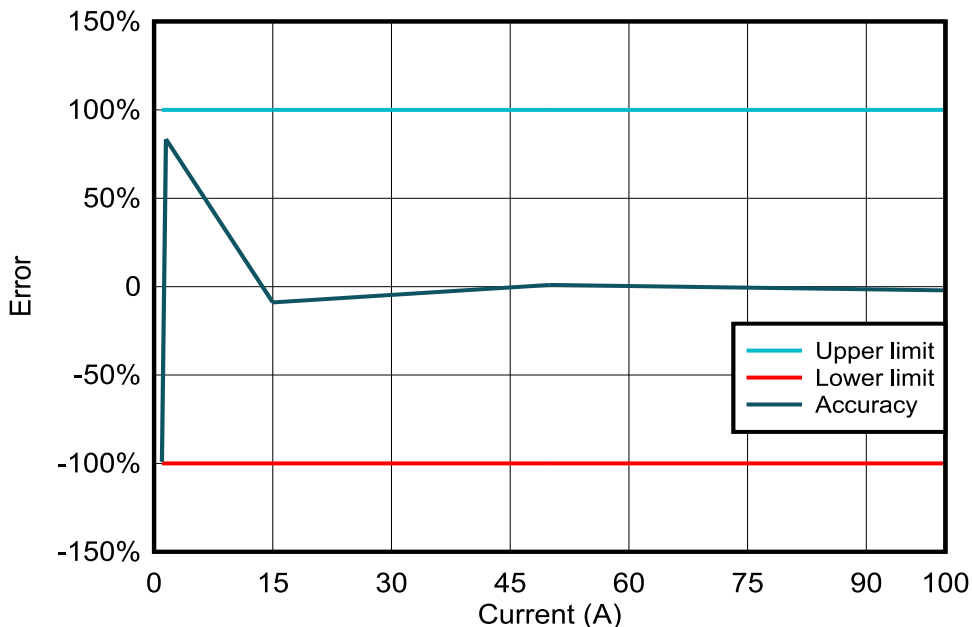


図 4-21. 外部磁界の影響を考慮した TIDA-011013 精度測定

観察所見: TIDA-011013 は、ヘルムホルツ コイルによって生成される外部磁場によって許容誤差の範囲内を維持しました。

5 設計とドキュメントのサポート

5.1 ドキュメントのサポート

1. テキサス インスツルメンツ、『[LMR436x0-Q1](#)、36V、1A/2A 車載降圧コンバータ、TJMAX 150°C で 2.5μA 未満の IQ、4mm2 HotRod QFN』データシート
2. テキサス インスツルメンツ、『[TPS62850x-Q1](#) 2.7V ~ 6V、1A、2A、3A 車載降圧コンバータ、SOT583 パッケージ』データシート
3. テキサス インスツルメンツ、『[TLIN1021A-Q1](#) フォルト保護 LIN トランシーバ、インヒビットおよびウェイク付き』データシート

商標

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

Daniel Maaya は、テキサス インストルメンツのダラスのシステム エンジニアで、電力計測やグリッド インフラストラクチャのアプリケーション向けの高精度アナログ フロントエンドの設計の開発を担当しています。**Daniel** は、シグナル コンディショニング、計測準拠 (ANSI/IEC)、パワー コンバータ、ロゴスキーコイル ベースのセンシング システムに関する深い専門知識を持つ、電気エレクトロニクスおよびパワーエレクトロニクス分野でこの職務に就いています。アナログ ハードウェアの設計とシステムレベルの統合の両方に関する実践的な経験を持ち、高精度測定を目的とする EMC テストやキャリブレーションなどに携わっています。

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含みいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、TI は一切の責任を拒否します。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月