

# エネルギー メーター内の絶縁型電流センシングで使用するシグナル チェーンのコストと精度の最適化

Dr. Ralph Oberhuber

Precision analog-to-digital converters

## はじめに

太陽光発電や風力発電などの電力源を使用した、より持続可能性の高いエネルギー グリッドへの移行を進めている現状で、改善対象地域の特化、使用量の最適化、コスト削減を達成するうえで、個別の消費電力に関する詳細な情報を取得するエネルギー メーター デバイスが必要になっています。エネルギー計量サブシステムを必要とする電子最終製品には、スマート電気メーター、電気自動車 (EV) 充電ステーション、電源およびパワー ディストリビューション ユニット、スマート家電、街灯、ビルディング オートメーション コンポーネントなどが含まれます。このような製品の膨大な数によって、エネルギーメーター ソリューションのコストを可能な限り低く抑えることが求められています。一方、米国規格協会 C12 (米国) や欧州の計測機器指令 (Measuring Instruments Directive) などの地域計量規格では、正確性と安全性について厳しい要件[1]、[2]が課されています。

図 1 に、エネルギー計測アプリケーション内の代表的なシグナル チェーンを示します。単純化のため 1 つの相のみを示しています。A/D コンバータ (ADC) は、各位相の電圧と電流の測定とデジタル化を同時に実行します。その後、デジタル信号処理により、有効電力と無効エネルギー、ライン間電圧、基

本電力とエネルギー、高調波[3]などの計測パラメータを抽出します。

シグナル チェーンの基本的なビルディング ブロックは次のとおりです。

- ライン電圧検知フロント エンド (図 1 の A)。
- 電流測定センサ (B)。
- 電流センサと ADC (C) の間に接続するフロント エンドおよびシグナル コンディショナ。
- ADC (D)。
- デジタル信号処理ハードウェア (E)。
- ガルバニック絶縁 (F)。

ライン電圧センシングのフロント エンドはほとんどの場合、シンプルな抵抗分圧器[3]を使用して実装されますが、他のすべてのビルディング ブロックを選択するためのさまざまなオプションがあります。これらのシグナル チェーン コンポーネントのそれぞれに関して、性能、サイズ、コストの間にトレードオフが存在します。この記事では、電流測定センサとシグナル コンディショニング、および ADC の性能とコストのトレードオフに注目しています。

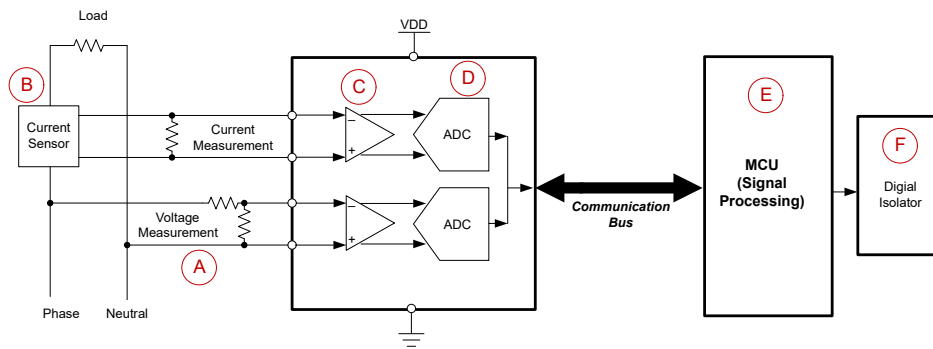


図1. エネルギーメーターサブシステムのシグナルチェーン。

## エネルギー測定に使用される電流センサ素子の比較

表1に、エネルギーメーターアプリケーションで使用される3つの電流センシングテクノロジーの性能上の利点と課題、およびコストとの対比を示します。電流トランスは、ダイナミックレンジが広く、耐久性が高く、挿入インピーダンスが低い(非侵襲的電流測定)[4]ため、最も一般的なセンサです。ただし、これらのコンデンサのコストは、すべての電流センシング技術の中で最大に達する可能性が高くなります。シャント抵抗(シャント)は、磁気耐性、サイズの小型化、コストの削減という特長から、非常に魅力的です。ただし、熱自己発熱[5]により絶縁が不足し、大電流では精度が低下します。

Rogowski コイルは他の2つのセンサに代わる興味深い代替品であり、特にプリント基板(PCB)コイルとバルク Rogowski コイル[6]を検討する場合に、最小コストのオプションになります。

センサの種類	変流器	Rogowski コイル	シャント
ブロック図			
伝達関数	$V_{out} = \frac{I_{line} R_{burden}}{N_{turns}}$	$V_{out} \propto \frac{dI_{line}}{dt}$	$V_{out} = I_{line} R_{shunt}$
利点	<ul style="list-style-type: none"> <li>絶縁を実現します</li> <li>高い直線性</li> <li>高い耐久性</li> <li>高い精度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>絶縁を実現します</li> <li>飽和は不可能です</li> <li>小型フォーム ファクタ (PCB)</li> <li>高い直線性</li> <li>迅速な応答時間</li> <li>低電力損失</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>非絶縁型</li> <li>反磁性</li> <li>小型フォーム ファクタ</li> </ul>
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>飽和が可能です</li> <li>負荷抵抗での電力損失を防止します</li> <li>位相キャリブレーションが必要です</li> <li>サイズと重量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>統合が必要です</li> <li>DC を測定できません</li> <li>PCB コイルの感度は低下する可能性があります</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>抵抗値は、自己加熱時に変化する場合があります</li> <li>過負荷信号に対する信頼性が低下します</li> </ul>

センサの種類	変流器	Rogowski コイル	シャント
コスト	\$0.21 以上 (シールドなし) \$0.26 以上 (シールドあり)	一部の PCB コイルは \$0.10 未満 バックル コイルは \$0.10 以上	\$0.10 以上 (マンガン)

表 1. 電流センサの比較

PCB Rogowski コイルは、低コストで柔軟な設置が可能であるため、低コストの電力量計アプリケーション[7]、[8]に最適です。PCB Rogowski ベースのメーター設計の利点と課題、また地域の計量規格に準拠しながら、実現可能な限り低いコストを実現するためにシグナル チェーンを最適化する方法を分析してみましょう。

## 電力測定で使用される PCB Rogowski コイルの感度と ADC ノイズ性能の比較

PCB Rogowski コイルの感度は通常、マイクロボルト / アンペアで規定され、形状 (巻数、コイル寸法)、コア材料 (ある場合)、電流周波数、環境要因 (温度、湿度、外部の磁界) によって異なります[9]。一般的な感度は、1 アンペアあたり数十マイクロボルトから数百マイクロボルト[9]です。

住宅用電気メーターでは、250mA の二乗平均平方根 (RMS) 位相電流を 2% の精度で測定することが一般的な精度要件となります[1]。たとえば、200 $\mu$ V/A の Rogowski コイルの場合、この位相電流では、ADC の入力の信号はわずか 200 $\mu$ V/A  $\times$  0.250A = 50 $\mu$ V となります。この信号を 2% の精度で測定するために必要な ADC 性能 (つまり、実効分解能を決定するノイズ) は、式 1 で定義されるように、0.02  $\times$  200 $\mu$ V/A  $\times$  0.250A = 1 $\mu$ V と低い値です。

$$V_{nADC} = tol \times k \times I_{phase-rms} \quad (1)$$

ここで、 $V_{nADC}$  は ADC に必要なノイズ レベル、tol は特定の位相電流、 $I_{phase-rms}$  (単位: アンペア) に対する指定測定精度 (パーセンテージ)、k は Rogowski コイルの感度定数 (単位:  $\mu$ V/A) です。

したがって、この例では、ADC の合計ノイズ (量子化ノイズとホワイトノイズ) は 1 $\mu$ V 未満である必要があります。

1 $\mu$ V ADC のノイズ要件を、テキサス インストルメンツ (TI) ADS131M08[10] などの高精度 ADC の仕様と比較すると、意図した性能レベルを達成するには、ADC サンプルの平均化が追加で必要になる可能性があることは明らかです。表 2 に、この平均化を示し、オーバー サンプリング比 (OSR) で定義されるさまざまなゲイン設定およびデータ レートにおける

ADC の合計ノイズ (RMS  $\mu$ V) を示します。ゲインが 1、サンプル レートが 4kSPS (OSR = 1,024) の場合、ADC のノイズは約 5 $\mu$ Vrms です。平均化時間が 2 倍にすると、ノイズが  $\sqrt{2}$  倍に改善されるため、1 $\mu$ V 未満の ADC ノイズという要件を実現するには、16ms 以上の期間が必要です。これは、一般的に 20ms の更新レートを必要とするほとんどのエネルギー計量システムで許容されます[1]。この種の平均化は、デルタ シグマ ADC の内部オーバー サンプリング比 (OSR) 機能と外部平均化後の平均化を使用する ADC 内部オーバー サンプリングの組み合わせにより、実用的に実装できます。

表 2 で推奨される別のオプションは、入力[10]を基準とするノイズを低減するため、ADC 内部のプログラマブル ゲイン アンプ (PGA) のゲインをより高いゲインを選択することです。代わりに、信号が ADC に到着する前に、外部ゲイン段を使用して信号を事前調整することもできます。ただし、外部ゲイン段を使用すると、シグナル チェーンのコストが大幅に増加します。

平均化時間 (ms)	OSR	データレート (kSPS)	ノイズ ( $\mu$ Vrms)、ゲイン 1	ノイズ ( $\mu$ Vrms)、ゲイン 128
16	65,392	0.0625	0.95	0.07
8	32,696	0.125	1.34	0.10
4	16,384	0.25	1.90	0.42
2	8,192	0.5	2.39	0.57
1	4,096	1	3.38	0.77
0.5	2,048	2	4.25	1.00
0.25	1,024	4	5.35	1.20
0.125	512	8	7.56	1.69
0.0625	256	16	10.68	2.40

表 2. ADC のノイズ性能と速度、平均化時間、OSR の関係。

## Rogowski コイルをベースとする電流センサにおける ADC シグナル チェーンの感度分析

低コストの PCB Rogowski 電流センサを使用するシステムにとって主要な懸念事項は、センサ出力における信号振幅が通常非常に小さく、ほとんどの場合はわずか数  $\mu\text{V}$  であることです。計量規格の要求精度を満たすために、シグナル チェーンを注意深く設計する必要があります。このような小信号のシグナル コンディショニングは、内部ゲインを持つ高分解能 ADC を選択するか、センサと ADC の間に外部ゲイン段をカスケード接続することで、大きな差動ゲインを含める必要があります。外部ゲイン段を追加すると、合計コストが増加するため、多くの場合は有害です。そのため、外部ゲイン段を必要とするソリューションと、それらを回避できるソリューションを定量化する方が適切です。

**表 3** 外部ゲイン段の有効性を分析するために、3 種類の Rogowski コイルを導入しました。

- コイル A は、PCB Rogowski コイル センサ[11]を使用した高精度 AC 電流測定リファレンス デザインをベースとする PCB Rogowski コイルです。感度は約  $20\mu\text{V}/\text{A}$  です。
- コイル B は、約  $100\mu\text{V}/\text{A}$  の感度を持つ独自の Rogowski コイルの 1 つです。
- コイル C は、約  $500\mu\text{V}/\text{A}$  の感度を持つ市販のバルク Rogowski コイル (Pulse PA3209NL) [12]です。

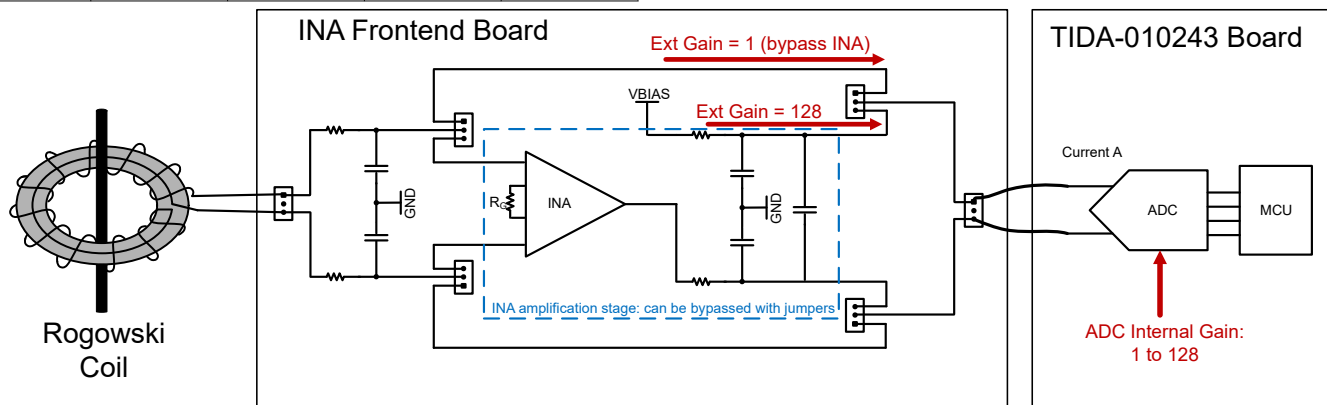
個数	コイルのタイプ	ソース	感度 ( $\mu\text{V}/\text{A}$ )	コスト
A	PCB	TI リファレンス デザイン	20	低

個数	コイルのタイプ	ソース	感度 ( $\mu\text{V}/\text{A}$ )	コスト
B	PCB	独自技術	100	中
C	バルク	パルス PA3209NL	500	高

**表 3.** シングル チェーン解析中の Rogowski コイル

**図 2** に、感度分析の測定設定を示します。**表 3** に示す、個別の Rogowski コイルそれぞれの出力は、シグナル コンディショニング インターフェイス ボードに接続します。このボードは、4 個のジャンパを使用して、TI の INA188 ベースのゲイン段 [13]を選択またはバイパスすることができます。ゲイン定義抵抗  $R_G$ (**図 2**を参照) は  $390\Omega$  であり、オプションとして外部ゲインは 128 になります。

計測アンプ (INA) インターフェイス ボードの出力は、スタンドアロン ADC 使用、3 相電流トランス ベース e メーターのリファレンス デザインの位相 1 電流入力に接続します[3]。このリファレンス デザインには負荷抵抗  $R_{37}$  と  $R_{38}$  が含まれています。これは、電流トランスに接続する場合にのみ必要とされるもので、この分析で物理的に取り外したものです。E メーターリファレンス デザインに搭載された ADC は TI **ADS131M08** です。この ADC は、高精度、8 チャネル、同時サンプリング デルタシグマ ADC で、1 ~ 128 の範囲の内部ゲイン オプションがあります。



**図 2.** シグナル チェーン分析向け測定のセットアップ。

図 3 および 図 4 に、MTE の PTS3.3C ソース ジェネレータ および基準メータを使用した 50Hz のライン電流で 100mA から 10A までの電流測定精度を示します。[3]と同じテスト手順を使用して、電流とエネルギーのサンプルは、20ms の期間にわたって平均化されます。[11]で概説した手順に従って、デジタル領域でロゴウォスキー信号統合を実装します。代わりに、[14]に示すようなアナログ アクティブ積分を使用することもできますが、今回の分析ではこの 2 つの方法は通常同様の結果を得るため、この手法は無視されます。

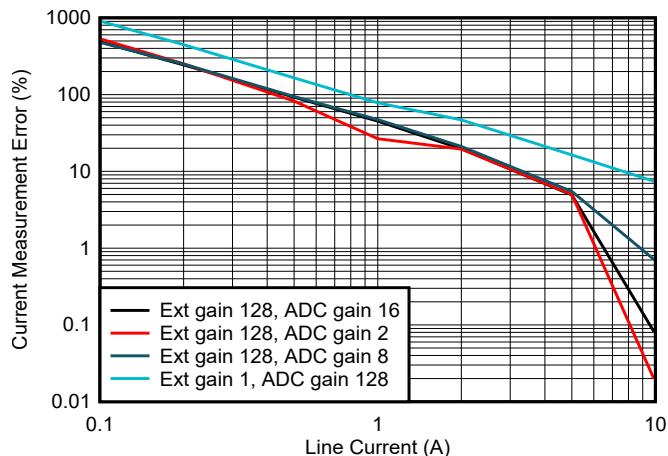


図 3. ゲイン設定が異なる  $20\mu\text{V}/\text{A}$  コイルの測定電流精度。

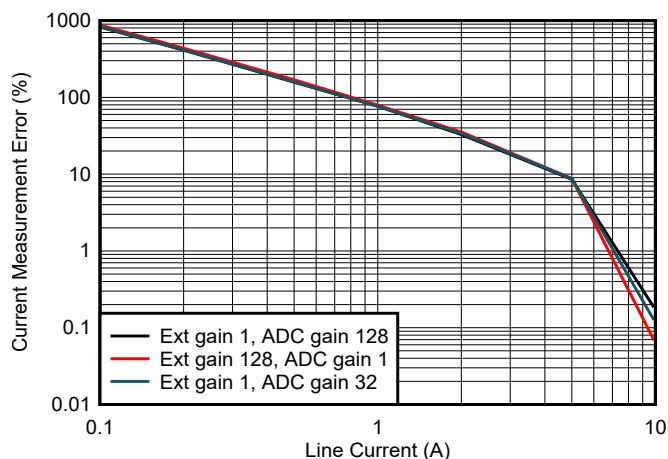


図 4. ゲイン設定が異なる  $100\mu\text{V}/\text{A}$  コイルの測定電流精度。

感度が非常に低い (例:  $20\mu\text{V}/\text{A}$ ) PCB コイルでは、INA 段をカスケード接続することで、外部ゲイン 128 の場合は大幅に改善されます (図 3 を参照)。ADS131M08 の内部 PGA ゲイン (ゲインが 128 でも) だけでは、すでに説明したように、量子化ノイズレベルを超える小さな入力信号を十分に上昇させることはできません。

感度が  $100\mu\text{V}/\text{A}$  以上の PCB コイルを使用する場合 (図 4 を参照)、内部ゲインと外部ゲインの選択によって比較可能な誤差が生じ、該当する位相電流範囲の量子化ノイズレベルをセンサの出力振幅が十分に上回っていることを示します。0.5% 以下の精度を目標とした、結果として発生する誤差の絶対値が、一部の収益グレードの電力計測システムでは許容範囲よりも高くなっています。この誤差の増加は、このセットアップで適用される単純化された較正手順、シングルポイント (ゲイン) 較正の結果です。標準的な計量設計では、最大 3 つの較正ステップ (オフセット較正、ゲイン較正、位相キャリブレーション) を適用することで、絶対誤差をさらに低減できます。

図 5 および 図 6 に、表 3 示す 3 つの異なるコイルにおける Rogowski コイルの感度に対する測定誤差の依存性を示します。

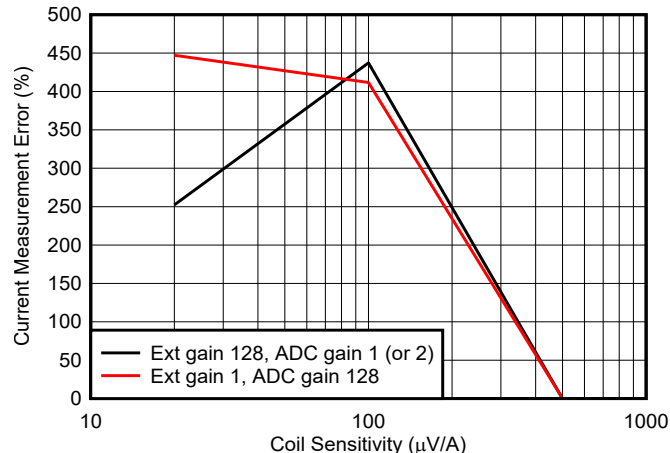


図 5.  $200\text{mA}$  のライン電流における 3 つのコイルの電流測定精度。

位相電流が小さい ( $200\text{mA}$ 、図 5) 場合と中レベル位相電流 ( $5\text{A}$ 、図 6) の場合の両方で、 $20\mu\text{V}/\text{A}$  の Rogowski コイルは外部ゲイン段を採用することで大幅な改善 (誤差の低減) を達成します。予想どおり、大きなライン電流値 ( $5\text{A}$ 、図 6) を検出すると、すべての誤差は小さい値にスケールされます。 $100\mu\text{V}/\text{A}$  および  $500\mu\text{V}/\text{A}$  の Rogowski コイルについては、128 の外部ゲインを適用するのに対して、内部 ADC ゲインを使用すると、同等の精度が得られます。

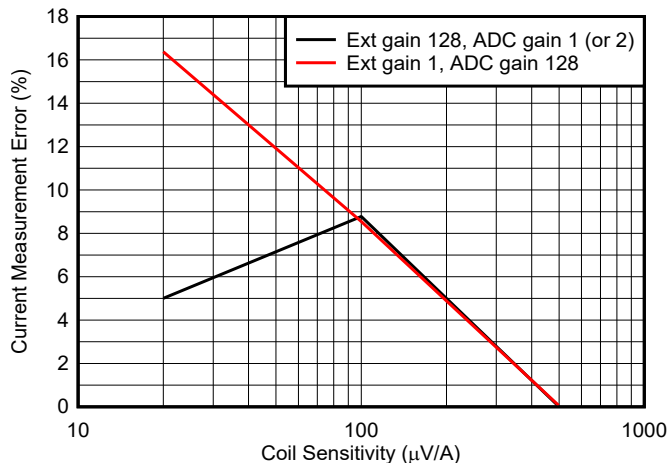


図6. 5A のライン電流における3つのコイルの電流測定精度。

## まとめ

100μV/A以上のRogowskiコイルの場合、外部ゲイン段は不要なため、電力量計のシグナルチェーンソリューションのコストを削減できます。TIのADS131M08または同等のADCを使用する場合、100μV/A未満のRogowskiコイルの場合、住宅用の電気メーターの精度を満たすために外部ゲインが必要になる場合があります。または、付加的な回路を回避するために、低ノイズで高コストのADCを検討することもできます。

## 参考資料

- ブラッド、ケレチャヴァ **ANSI C12.20-2015 – 電気メーター – 0.1、0.2、0.5 精度クラス**。米国規格協会 (ANSI) ブログ、2017年5月8日。
- 欧州議会および欧州理事 2004/22 会 (2004年3月31日) の計量器に関する指令 (<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2004L0022:20130101:en:PDF>)。ドキュメント 32004L0022。欧州連合:ブリュッセル、ベルギー。2004年3月31日。
- テキサス・インスツルメンツ (発行年記載なし) **スタンドアロン ADC 使用、3 相、電流トランス ベース e メーターのリファレンス デザイン**。テキサス インスツルメンツのリファレンス デザイン No. TIDA-010243。アクセス日: 2025年3月14日。
- Blue Jay. n.d. **変流器の利点と欠点は何ですか?** アクセス日: 2025年1月21日。
- Krunal, Maniar. **HEV/EV におけるシャント ベースとホール ベースの絶縁型電流センシング ソリューションの比較**。テキサス インスツルメンツ アプリケーション概要、文献番号 SBAA293C、2018年6月。
- 電気電子学会 (IEEE) 電力システムリレー委員会 (PSRC)。 **Rogowski コイル アプリケーションからリレーへの実用的な側面**。IEEE PSRC 特別レポート、2010年9月。
- Aim Dynamics。 **Rogowski コイルと変流器の比較**。Aim Dynamics ブログ投稿、2023年7月24日。
- ブルックス、クリス。 **Rogowski コイルを選択する理由?** Setra ブログ投稿、2017年2月13日。
- サロモン、ビクター。 **二相 Rogowski コイルベースの電気メーター アナログ フロントエンド回路**。テキサス インスツルメンツ アナログ エンジニア回路、文献番号 SBAA385A、2020年7月。
- テキサス・インスツルメンツ (発行年記載なし) **ADS131M08 24 ビット、32kSPS、8 チャンネル、同時サンプリング、デルタシグマ ADC**。アクセス日: 2025年1月21日。
- テキサス・インスツルメンツ (発行年記載なし) **PCB Rogowski コイル センサを使用する高精度 AC 電流測定のリファレンス デザイン**。テキサス インスツルメンツのリファレンス デザイン No. TIDA-01063。アクセス日: 2025年3月14日。
- パルス エレクトロニクス (発行年記載なし)。 **PA3209NL サイドワインダ電流センサ**。アクセス日: 2025年3月19日。
- テキサス・インスツルメンツ (発行年記載なし) **INA188 36V、ゼロドリフト、レール ツー レール出力計測アンプ**。アクセス日: 2025年1月21日。
- テキサス インスツルメンツ (発行年記載なし) **Rogowski コイル向けアクティブ積分器のリファレンス デザイン、リレーブレーカ用の精度を向上した**、テキサス インスツルメンツのリファレンス デザイン TIDA-00777。アクセス日: 2025年3月19日。

**重要なお知らせ:**ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 重要なお知らせと免責事項

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

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

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

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかるテキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated