

Application Brief

E メーターで Rogowski コイルに切り替える利点

Daniel Maaya

はじめに

信頼性の高い電気メーターを設計するための第一歩は、適切な電流センサを選択することです。電流トランス (CT)、シャント抵抗、Rogowski コイルは、最新の E メーターで最も一般的に使用されている 3 つのオプションですが、それぞれに温度変化、絶縁と絶縁の要件、改ざんの受けやすさなどの制限があります。これらの欠点に適切に対処しないと、電力会社の不正確なエネルギー測定や財務損失などの深刻な結果につながる可能性があります。

このアプリケーション ノートでは、E メーターの設計者がこれらの電流センシング テクノロジーを明確に比較できるようにすることを意図しています。ここでは、各センサタイプの利点と欠点の概要を示し、これらの欠点がシステム性能にどのように影響するかを説明しています。最終的には、設計者がメーター アーキテクチャに対して最も望ましい電流センシング ソリューションを選択するために役立ちます。

各電流センサの制限**電流トランス (CT)**

電流トランス (CT) は、広い電流範囲と温度範囲にわたって、高精度、優れた直線性、信頼性の高い性能を提供するため、高精度メータリング アプリケーションに適しています。電子部品を保護するためにガルバニック 絶縁を提供し、電力損失も小さいという利点があります。ただし、精度にもかかわらず、CT にはいくつかの設計や運用上の制限があるため、最新のメータリング システムではあまり好ましくありません。これらの制限には、高コスト、改ざん、サイズと重量、製造上の制約が含まれます。

改ざんと信頼性に関する懸念:

CT の最も重要な課題の 1 つは、改ざんです。この問題は、メーターメーカー、ベンダ、特に電力会社にとって主要な懸念事項です。課金精度が妥協すると、メータ自体のコストよりも財務損失がはるかに大きくなる可能性があります。改ざんは通常、磁気コアの物理的な制限によって発生されます。たとえば、CT は、センサの近くに磁石を配置する、高電圧パルスを入力端子に印加する、または中性線をアースに接続するだけで飽和させることができます。これにより、測定精度を歪めたり、デバイスを完全に機能しなくなり、誤った課金につながる可能性があります。

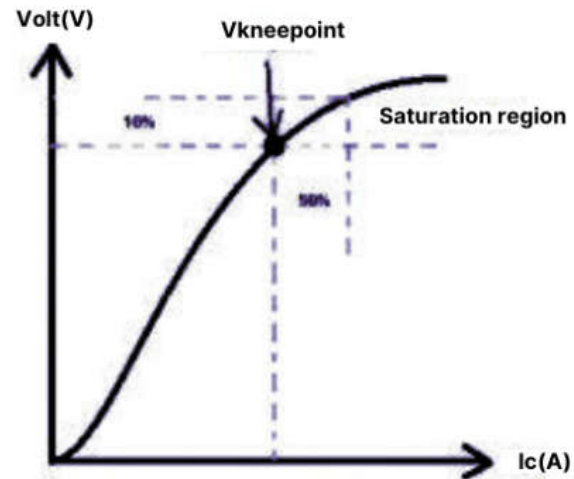


図 1. 過電流による電流トランスの飽和

コストと製造上の制約:

代替の電流センシング テクノロジーの検索を進める上で CT のコストも重要な要因です。住宅用および商業用エネルギーメーターは大量生産され、約 10 年続くと予想されるため、コスト効率が不可欠です。CT メーカーは通常、低コストで標準サイズのみを提供しますが、カスタム CT はかなり高価です。この柔軟性がないことで、メーターの設計者が制限され、お客様や電力会社の仕様に準拠できないように設計上の妥協を強いられることがあります。このような制限は、製造業者やベンダーにとって製品の損失につながるだけでなく、貴重なエンジニアリング開発時間も無駄にします。

サイズと重量:

最初は完全な CT ベースのメーターはコスト効率の優れているように思えるかもしれませんが、電流トランスの物理的特性、特にサイズと重量が、物流上の大きな課題をもたらす可能性があります。大型の CT は、輸送の複雑さと輸送コストの両方が増加します。特に、大量に配布する場合に影響が大きくなります。場合によっては、輸送、取り扱い、梱包のコストを組み合わせることで、初期コストの優位性を相殺するのに十分な単位あたりの全体的な価格を上げることができます。この追加コストにより、CT ベースのメーターが市場での競争力を低下させる可能性があり、大手ベンダーやメーカーは、より軽量でコンパクトで、出荷しやすい

いメーターを提供する競合他社の入札や顧客を失う可能性があります。

シャント抵抗

コスト効率の高いメーターでは、単純な動作原理、低コスト、コンパクトな形状のため、通常、電流センシングにシャント抵抗が使用されます。シャント抵抗は、優れた直線性、高速応答、広い電流範囲での安定した性能を提供します。シャントベースのセンシングにより、磁気部品を使用せずに高精度の測定が可能となり、磁気センサで一般的に発生する飽和やヒステリシスなどの問題を解消できます。ただし、シンプルで高精度なにもかかわらず、シャント抵抗には特定の測定システムでの使用に制限を加えるいくつかの課題が存在します。これらの制限には、電氣的絶縁の欠如、大電流時の消費電力の増加、温度ドリフト、高電圧環境での潜在的な障害が含まれます。

電氣的絶縁欠如:

シャント抵抗の主な欠点の 1 つは、測定回路と高電圧ラインの間に電氣的絶縁がないことです。ガルバニック絶縁を本質的に提供する電流トランスとは異なり、シャントは電流パスに直接接続し、測定システムをライン電圧にさらすことになります。この絶縁の欠如は、特に高電圧システムや 3 相システムにおいて機器を損傷するリスクを伴います。また、絶縁型 ADC のような追加の絶縁回路が必要となり、設計の複雑さ、コスト、スペースが増加し、シャントの魅力であるシンプルさを相殺してしまいます。

高電流時の消費電力および温度ドリフト:

電流がシャント抵抗を流れると、電力は $P = (I^2) R$ に従って熱の形で放散されます。電流レベルが高い場合、抵抗値が小さい場合でも、大きな発熱が発生する可能性があります。この熱は効率を低下させるだけでなく、抵抗の温度が上昇し、性能と長期的な信頼性の両方に影響を及ぼします。抵抗の温度が変化すると、抵抗値はわずかに変化し、測定誤差が発生します。熱変動の大きい屋外や産業用環境です。アプリケーションで十分な放熱が確保されない場合、シャント抵抗は定格電流の 1/4 以上では動作できません。温度ドリフトは、時間の経過とともに累積的なエネルギー測定誤差を引き起こす可能性があるため、Class 0.1 以上の精度規格に準拠する必要がある高精度メータリング アプリケーションではシャント抵抗の方があまり推奨されません。

高定格の抵抗または熱管理設計 (ヒートシンクとファン) を採用した結果、設計が大きくなり、コンパクトでエネルギー効率の高いメータリング システムでは効率が低下します。

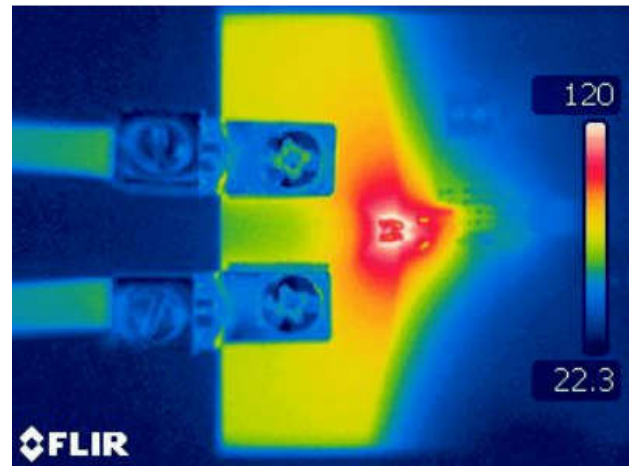


図 2. 50A 時のシャント抵抗の熱動作

高電圧システムの故障:

高電圧メータリング アプリケーションでは、シャント抵抗は大電流と大きな電位差の両方に対処する必要がありますので、保護上のリスクにつながります。短絡やサージのような障害は、致命的な障害、付近の回路の損傷やユーザーの危険につながる可能性があります。十分な沿面距離、空間距離、絶縁を確保することで、PCB の複雑さとコストが増大します。そのため、シャント抵抗は低電圧または DC メータリングに優れていますが、絶縁と障害保護が重要な高電圧 AC システムでは、実用的ではなく、安全性が低くなります。

Rogowski コイル

Rogowski コイルは、高電圧、大電流、広い周波数範囲のような極端な条件下で、サイズ、柔軟性、カスタマイズ性、性能が重視される最新の各種メーターシステムに採用されています。磁気コアがないため、Rogowski コイルは改ざんが電力会社の財務損失につながり得るメータリング用途で好まれます。強磁性コアがない Rogowski コイルは本質的に磁気飽和やヒステリシスの影響を受けないため、大電流過渡、歪んだ波形、重畳信号が存在しても一貫した性能を維持できます。

Rogowski コイルの主な利点の 1 つは、設計とフォームファクタが多様性を持つことです。導体やバスバーの周囲に収まるようにさまざまなサイズと形状で製造でき、特にプリント基板 (PCB) を使用して製造できます。PCB

Rogowski コイルには、軽量、コスト効率、高いカスタマイズ性など、コンパクトなメータリング設計に適したいくつかの利点があります。従来の CT、シャント、ホール効果センサとは異なります。

Rogowski コイルは di/dt センサです。つまり、時間の経過に伴う電流変化率を測定し、その変化に比例する電圧を出力します。したがって、コイルの出力は、実際の電流波形に対して 90° の位相差があります。正確な電流表現を得るために、信号は積分回路を通過します。積分回路で

は、元の電流波形を再構築して測定と分析を行います。これは、外部のアプリケーションアンプ (op アンプ) またはソフトウェア統合アルゴリズムを使用して実行できます。

Rogowski コイルのもう 1 つの大きな利点は、本質的に電氣的絶縁です。導体と物理的に接触しないため、計測用電子回路を高電圧ラインから絶縁し、電圧スパイク、サージ、過渡バーストから保護します。また、PCB Rogowski コイルは差動配線が可能で、優れた同相ノイズ除去が実現し、電磁干渉 (EMI) に対するセンサの耐性が高まります。磁性材料がないためにコア温度ドリフトがないため、広い温度範囲にわたって安定した精度が確保されます。

Rogowski コイルには多くの利点がありますが、E メーターの電流センシングに最適な選択肢にする必要がある設計上の課題もいくつかあります。特に、外部の信号コンディショニングの必要性は、アプリケーションの電流範囲、周波数、精度の要件によって異なります。

低電流または高精度のメータリング アプリケーションでは、電流波形を正確に再構築するために増幅段および集積段を備えた外部の信号コンディショニング回路が必要です。ただし、電力品質監視や産業用メータリングのような高周波または高振幅の環境では、コイル固有の周波数依存感度は周波数とともに (線形関係で) 増加し、追加回路を必要とせずに、直接測定できる十分な大きさの出力電圧が生成されます。

信号 コンディショニング回路が必要な場合、INA828、INA333、INA826、INA823 などの高精度計測アンプや TLV9001、電源、受動部品などのアクティブ積分器を内蔵することで、部品表 (BOM) とシステム全体のコストが必然的に増加します。ただし、このように複雑さの増加は、高精度、安定性、および課金精度が重要なパフォーマンス要件であるアプリケーションでは正当化されます。このような場合、適切に設計された Rogowski ベースのセンシングシステムは、従来の電流センサやシャント抵抗に比べて、設計の柔軟性、絶縁性、長期的な信頼性を十分に確保できます。

Rogowski コイルは電磁センサであるため、電流を流す導体の周囲での向きは、信号の整合性およびシステム全体の安定性を維持するうえで重要な役割を果たします。メーターがコイルを特定の方向に配置してキャリブレーションされている場合、それ以降のコイルの動きや変位があれば、磁気カップリングが変わる可能性があります。その結果、正確な測定を検証するには、メーターを再キャリブレーションする必要があります。ただし、これはメーターのメーカーやベンダに懸念を抱く可能性があります。ただし、ほとんどのメーター設計者はコンパクトな設計を目指して、PCB Rogowski コイルをワイヤの周りに密着して向きの変化は無視できるようになっています。これは、信号の信頼性と整合性を維持しながら、ソリューション全体のコンパクト化に貢献します。

Rogowski コイルの信号コンディショニング回路の部品数が多いことが、エネルギーメーターの標準的な 10 年間の

寿命全体で精度を維持する能力に影響を及ぼす可能性があるという懸念から生じるものもあります。ここで、キャリブレーションの重要性が重要になります。各メーターは出荷前に工場でのキャリブレーションを実施する必要があります。ANSI C12.1 (2024) などの規格の対象となる場合、精度規格への適合を確認するため、設置時に現場でキャリブレーションが実施されることもあります。Rogowski ベースのメーターが適切にキャリブレーションされると、電圧、電流、電力の測定の変動が効果的に補償されます。その結果、システムは長期的な測定安定性と精度を維持し、メーターの使用期間を通じて信頼性の高い課金精度を確保します。

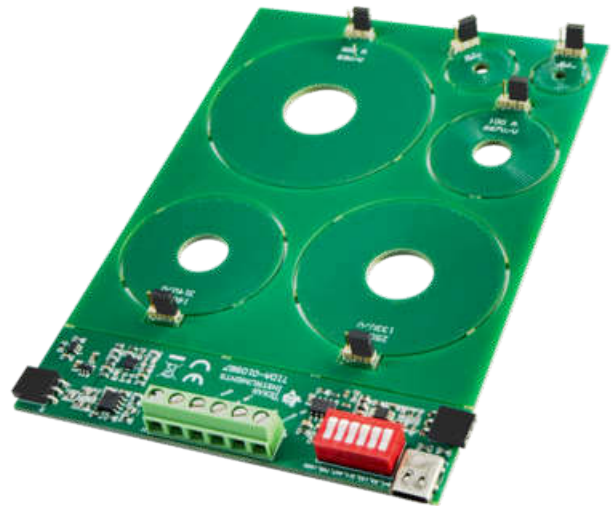


図 3. TIDA-010987 PCB Rogowski 電流センサ



図 4. TIDA-010986 E メーター向け Rogowski 信号コンディショニング回路

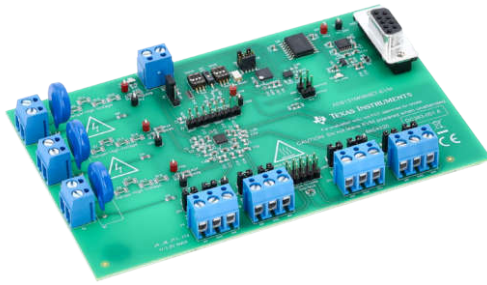


図 5. ADS131M08MET-EVM

まとめ

エネルギー メータリングにおける電流センシング技術の進化により、PCB Rogowski コイルが最新の E メーター設計における次の主要トレンドであることが明らかになっています。電流トランス (CT)、シャント抵抗、ホール効果センサなどの従来のセンサと比較して、PCB Rogowski コイルは精度、絶縁、フレキシビリティ、製造性のバランスが優れています。

コアレスの差動巻線構造を活用することで、Rogowski コイルは磁気飽和、ヒステリシス、改ざんの受けやすさなどの問題をなくし、広い範囲の電流にわたって安定した線形性能を確保します。PCB 実装により、軽量・低コストで再現性の高い製造および校正プロセスが実現し、コンパクトで高密度なメーター設計への統合が可能になることで、これらの利点はさらに強化されます。

Rogowski コイルは、特に小電流や高精度アプリケーションでは、信号コンディショニングとキャリブレーションが必要になる場合がありますが、この技術の利点はこれらの考慮事項を上回っています。ANSI C12.1 (2024) のような規格で要求される適切なキャリブレーションにより、測定のドリフトや部品のばらつきが効果的に補償されることを保証し、メーターの寿命全体にわたって課金グレードの精度を維持します。

最終的に、PCB Rogowski コイルへの移行により、メーターメーカーや電力会社は、よりスマート、より小型、より無制限、より回復力の高いメーターへと向かう道を歩んでいきます。その拡張性、改ざんに対する耐性、設計の柔軟性、長期的な安定性により、次世代エネルギー測定システムや他の多くのアプリケーションの代替製品であるだけでなく、戦略的な改良となっています。

ADS131M08MET-REF、TIDA-010986、および TIDA-010987 は、収益用メーターにおける PCB Rogowski コイルの採用を可能にすることを目的とした、TI の最新リファレンスデザインです。これらは ANSI および IEC 規格に基づいて評価され、クラス 0.1 の精度を達成しており、E メータリングにおいて PCB Rogowski コイルが抱えるあらゆる制約に対応できるよう設計されています。

表 1. 電流センサの比較

仕様	変流器	シャント抵抗	PCB ログスキーコイル
DC 感度があります	DC で飽和します	DC を測定します	DC を測定しません
改ざん耐性が高い	改ざんが容易	改ざんが容易	改ざん耐性があります
温度ドリフト	わずかに影響を受けます (コア依存性)	影響を受ける	影響を受けない
絶縁	ガルバニック絶縁	絶縁が必要 (デジタルまたはアナログ)	電磁絶縁
外部回路	負荷抵抗	外部回路は不要です	一部のアプリケーションでは、高精度アンプおよび積分器が必要です
電流範囲	A – kA	mA – A	mA – kA
周波数帯域幅	制限付き (50/60Hz – 数千 Hz)	最大 kHz	最大 MHz
サイズ	大型	中	カスタム化可能

表 2. TI のリファレンス設計の選定

位相数	CT ベース	Rogowski ベース	シャント ベース
1 (単相)	ADS131M08MET-REF / TIDA-010243	TIDA-010986 / TIDA-010987	TIDA-010940 / AMC-ADC-1PH-EVM
分割	x	x	TIDA-010944
3 (多相)	ADS131M08MET-REF / TIDA-010243	TIDA-010986	TIDA-010244

重要なお知らせと免責事項

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

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月