

Design Guide: TIDA-010971

回路ブレーカ向けエッジ AI を用いた AC アーク故障検出リファレンス デザイン



説明

このリファレンス デザインは、AC アーク故障検出を可能にするアナログ フロント エンドを特長としています。AI モデルは、組込みマイコン上で動作します。複数のセンシング チャンネルにより、電流フィルタ、電圧センシング、および高周波アーカー エネルギーに対するログ検出を通じて、AI によるアーカー故障検出を評価します。PCB Rogowski 電流センサは、シグナル チェーンに電力を供給します。このボードは、MSPM0G5187-LP のような互換性のある LaunchPad™ と組み合わせます。

リソース

| | |
|-------------------|------------|
| TIDA-010971 | デザイン フォルダ |
| TLV387、TLV9054 | プロダクト フォルダ |
| MSPM0G5187、LOG300 | プロダクト フォルダ |
| UCC28881、TPS709 | プロダクト フォルダ |

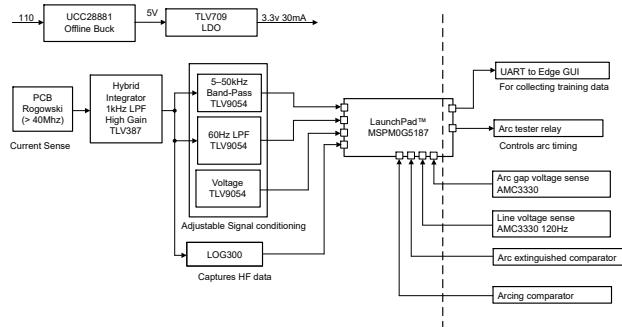
テキサス・インスツルメンツの™ E2E サポート エキスパートにお問い合わせください。

特長

- PCB Rogowski に内蔵
- AI アクセラレータを搭載した MSPM0G5187 向け LaunchPad™ 開発キット接続
- 10MHz 超の帯域幅を持つハイブリッド 積分器
- 40MHz 帯域幅を持つ LOG300
- データ収集を容易にする自動ラベリング回路

アプリケーション

- AFCI サーキット ブレーカ



1 システムの説明

1.1 用語

| | |
|-------------|---|
| AFCI | アーク故障回路遮断器 |
| AFD | アーク故障検出 |
| アーク ジェネレータ | リニア ステージに取り付けた銅ロッドにグラファイト ロッドを接触させて生成されるアーク |
| カーボナイザー | 高電圧トランスとワイヤ サンプルを使用するアーク ジェネレータ |

1.2 主なシステム仕様

表 1-1 に、主なシステム仕様を示します：

表 1-1. 主なシステム仕様

| 項目 | 説明 |
|---------------|---------------------|
| 消費電力 | 約 7mA ~ 17mA |
| 電源 | 10mA 時の効率は 17% |
| 入力電圧 | 110 ~ 250VAC |
| Rogowski 帯域幅 | 50Hz ~ 40MHz |
| Rogowski サイズ | 直径 12mm× 2 層 PCB 厚さ |
| Rogowski 感度 | 6kHz 時に約 0.4mV/A |
| ハイブリッド積分器の帯域幅 | 2kHz ~ 40MHz |
| ゲイン アンプ バンドパス | 6kHz to 50kHz |



注意

電源を入れたままその場を離れないでください。



警告

高電圧！ 基板上は高電圧状態になっており、接触するおそれがあります。感電する可能性があります。基板は、不適切に取り扱った場合に感電、火災、負傷の原因となる電圧および電流で動作します。負傷や物品の破損を避けるために、必要な注意と適切な対策をもって機器を使用してください。安全のため、過電圧および過電流保護機能付きの絶縁された試験装置の使用を強く推奨します。

テキサス・インスツルメンツは、基板への電源投入やシミュレーション実行の前に、電圧要件および絶縁要件を確認し理解することがユーザーの責任であると考えます。電源投入中は、回路およびその接続部品には触れないでください。



警告

表面は高温！ 触れ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！

基板の電源を入れると、一部の部品は 55°C を超える高温に達することがあります。動作中は常に、また動作直後も高温の状態が続く可能性があるため、基板に触れてはいけません。



警告

テキサス・インスツルメンツは、このリファレンス デザインをラボ環境のみで使用するものとし、一般消費者向けの完成品とはみなしていません。このデザインは室温で動作することを意図しており、他の周囲温度での動作はテストされていません。

テキサス・インスツルメンツは、このリファレンス デザインを高電圧電気 機械部品、システム、およびサブシステムの取り扱いに伴うリスクを熟知した有資格のエンジニアおよび技術者のみが使用するものとしています。

基板上は高電圧状態になっており、接触するおそれがあります。 基板は、不適切に取り扱ったり適用したりした場合に感電、火災、負傷の原因となる電圧および電流で動作します。負傷や物品の破損を避けるために、必要な注意と適切な対策をもって機器を使用してください。

2 システム概要

2.1 ブロック図

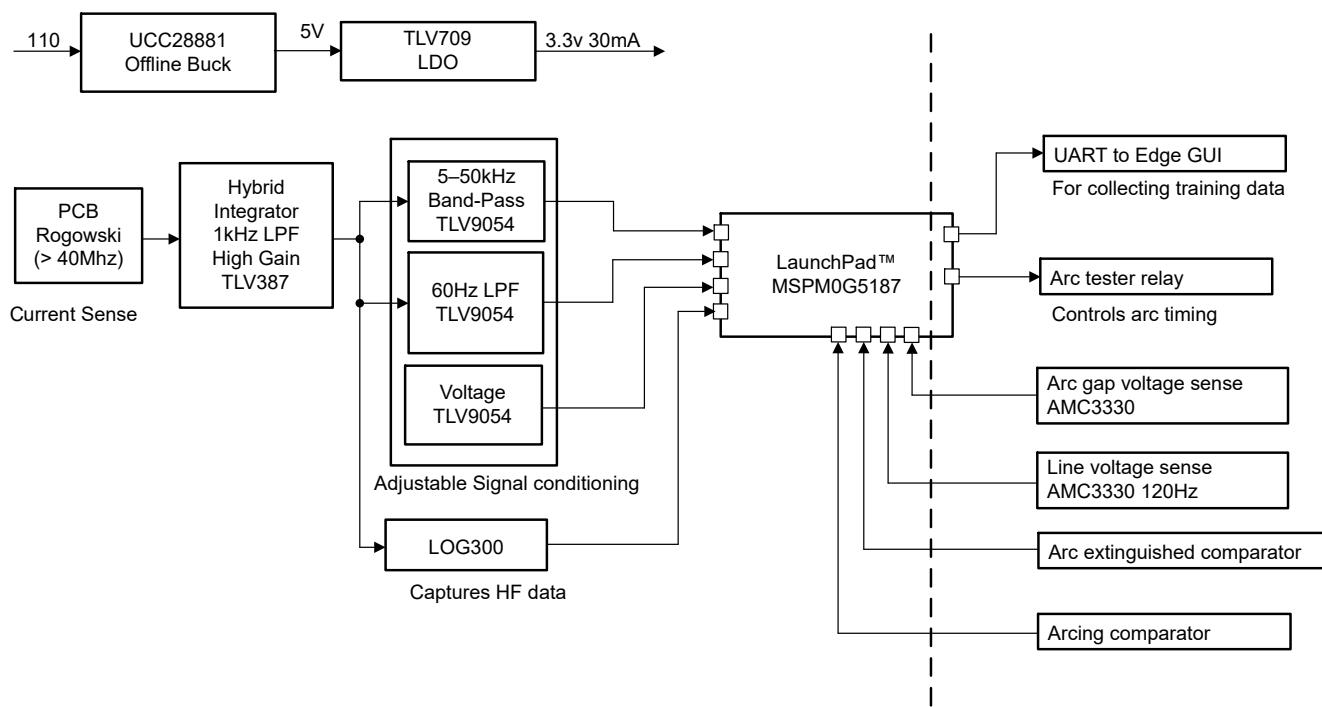


図 2-1. システム ブロック図

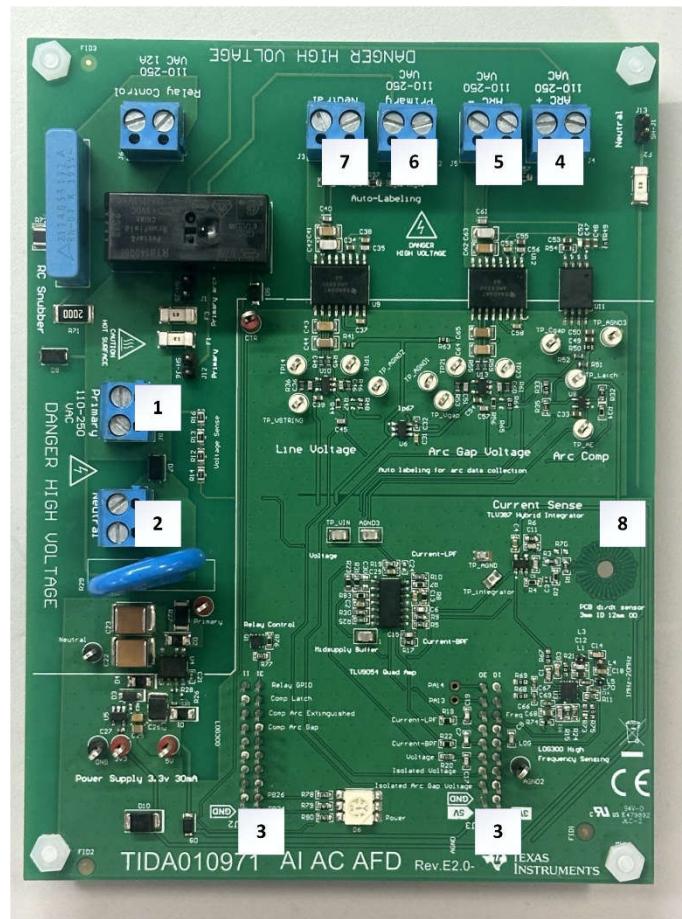


図 2-2. 接続ラベル付きボード画像

1. 入力電圧 1 次側: 110-250VAC
2. 入力電圧中間: 0V
3. LaunchPad 接続:(MSPM0G5187-LP)
 - a. PA16 A014 バンドパス電流
 - b. PB16 A019 電圧
 - c. PB22 A024 LOG300
 - d. PB14 A021 絶縁電圧
 - e. PB15 A020 絶縁アーク ギャップ
 - f. PA15 A015 ローパス電流
 - g. PB4 赤色 LED
 - h. PB5 緑色ハートビート LED
 - i. PA11 リレー GPIO
 - j. PA10 リレー ラッチ
 - k. PA31 コンパレータ アークが消灯
 - l. 3.3V
 - m. 5V
 - n. GND
4. アーク +: 120VAC (オプションの J1 ジャンパで一次側)
5. アーク -: 120VAC
6. 絶縁プライマリ 110 ~ 250VAC (オプション: J12 ジャンパから一次側)
7. 絶縁中性 0V (オプション: J13 ジャンパからニュートラル)
8. リレー制御: 出力: 110 ~ 250VAC、最大 12A

9. PCB ロゴスキー: 12AWG、内径: 3mm

2.2 設計上の考慮事項

2.2.1 センサの選択

回路ブレーカは、分岐回路配線を保護する必要があります。電流センサは、この保護を実現するための主要な手段となります。入力分岐電流を測定することが、この保護を実現する最も容易な方法です。

アーク故障検出では、電圧、電流、光、またはこれらを組み合わせたセンサが用いられます。アーク検出では、アークのシグネチャがセンサの選定を決定します。アークシグネチャは、アーク放電に特有なデータ特性を表します。関心のある周波数成分をフィルタリングすることで、これらの特徴が強調されます。また、高速フーリエ変換 (FFT) などの一般的な DSP 手法も、信号特性を強化します。

最終的なアプリケーションによって、追加要件が生じます。回路ブレーカは、一般的に 10,000A で割り込みをします。アーク故障遮断器は、5A から 500A のアークを遮断します。アーク放電信号は、10MHz まで、あるいはそれ以上の周波数を生成します。コスト、サイズ、製造性、直線性、および温度安定性が、センサの選定に影響します。

アーク電流データの解析は、時間がピンク色のノイズで変動するとしてアーク放電を示しています。この結果、広い周波数スペクトルが形成されます。図 2-3 は、これを、周波数に対してロールオフする FFT の垂直線と示しています。検出は MHz レベルの周波数で発生します。振幅は、時間によって、周波数によってランダムに変化します。

AC アークでは、電流がゼロのまま電圧が立ち上がる期間が生じます。アークギャップ電圧は、ギャップ内で空気をイオン化するのに十分な大きさに達している必要があります。この電流の非連続性により、電流と電圧の関係を測定するときにアーク放電特性が大きくなります。回路ブレーカ規格 UL1699 では、アークに対する電流スレッショルドが規定されています。これらの要因により、電流センサは分岐回路の保護におけるアーク検出に有利です。

他のアプリケーションでは、電圧に利点があります。電圧の定義では、ダイナミックレンジがより狭くなります。その結果、フィルタリングと DSP の要件がよりシンプルになります。このアプリケーションでは光センサは機能しません。回路全体のどこにでもアーク検出が発生する必要があります。

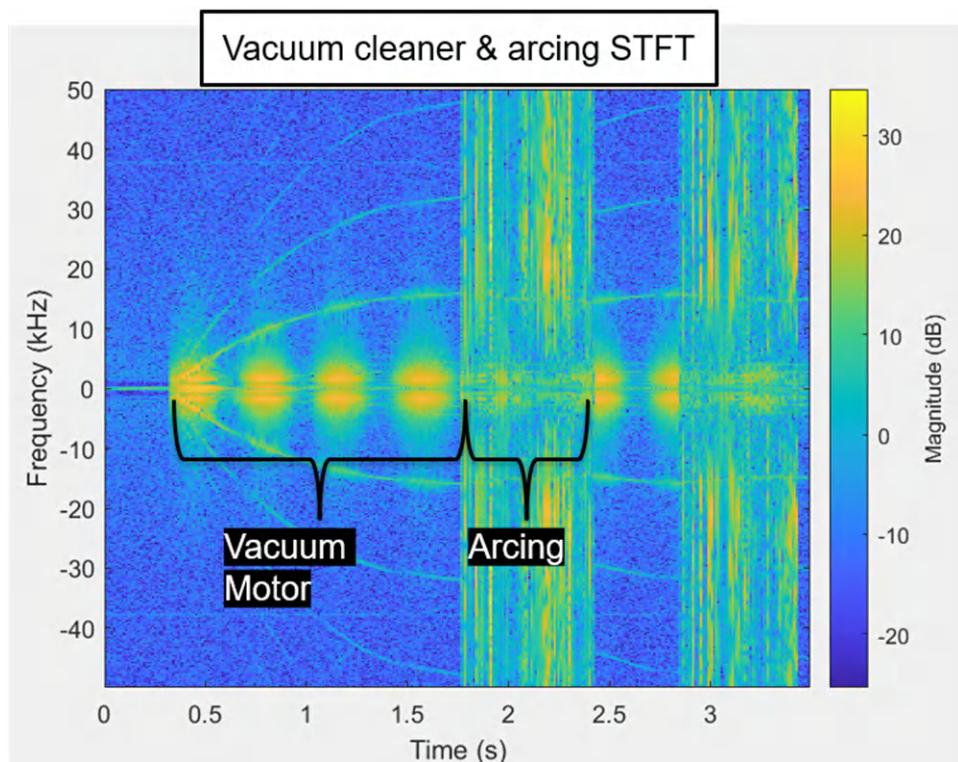


図 2-3. 真空負荷による時間の経過に伴うアーク周波数スペクトル

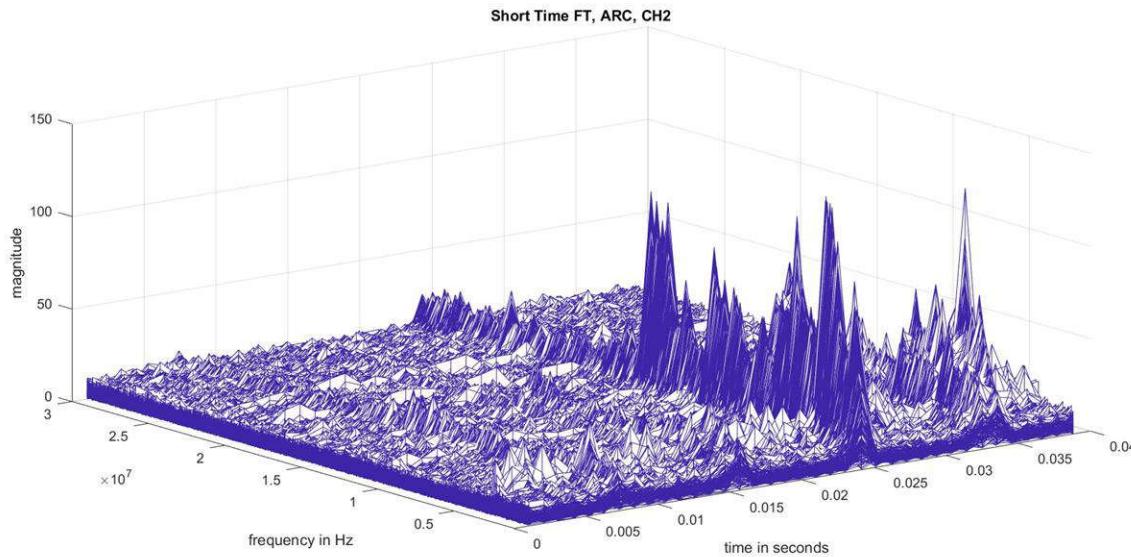


図 2-4. 真空負荷による 40ms 周期にわたる MHz のアーク放電周波数スペクトル

考慮対象となる電流センサには、変流器、Rogowski コイル、シャントなどがあります。

表 2-1. 電流センサの比較

| 電流センサ | 利点 | 欠点 |
|----------|--|--------------------------------|
| シャント | コンパクト、低コスト、高帯域幅 | 温度変動あり、非絶縁、10,000A に耐える必要があります |
| CT | 絶縁、優れた感度、飽和により誘導電圧が制限されます | 高帯域では大型化し、コストが高くなります |
| Rogowski | 広帯域幅、アーク放電周波数に対する高い感度、PCB (プリント基板) を内部に組み込んだ場合の小型化、低成本 | 積分器が必要で、低周波数に対して低い感度です |

2.3 主な使用製品

2.3.1 TLV387

TLV387 精密アンプは、最先端の性能を提供します。ゼロドリフト技術により、TLV387 のオフセット電圧およびオフセットドリフトに対して、比類のない長期安定性が提供されます。TLV387 は、 $570\mu\text{A}$ 静止電流によって 5.7MHz 帯域幅を実現しています。このアンプは、 $8.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ の広帯域ノイズと $177\text{nV}_{\text{PP}}/1/\text{f}$ ノイズを供給します。これらの仕様により、16 ビット～24 ビットの A/D コンバータ (ADC) において、非常に高い精度が実現されます。この仕様は直線性の劣化を防止します。TLV387 は、温度全域にわたってフラットなバイアス電流特性を備えています。高入力インピーダンスのアプリケーションでは、温度変化に対するキャリブレーションはほとんど、またはまったく不要です。

2.3.2 TLV9054

TLV9054 は、クワッド オペアンプとして動作します。このデバイスは、 $1.8\text{V} \sim 6.0\text{V}$ の低電圧電源で動作します。入出力は、非常に高いスルーレートでレール ツー レール動作を行います。このデバイスは、低電圧動作、高スルーレート、低静止電流を必要とするコスト制約のあるアプリケーションに適しています。

TLV905x ファミリは、 150pF の容量性負荷を駆動できます。抵抗性のオープンループ出力インピーダンスにより、より大きな容量性負荷に対しても安定化が容易になります。TLV905xS デバイスにはシャットダウン モードがあります。このモードでは、アンプを $1\mu\text{A}$ 未満に切り替えることができます。

TLV905x ファミリを使うと簡単に動作できます。これらのデバイスは、ユニティゲイン安定性を維持します。RFI および EMI フィルタが含まれています。オーバードライブ状態では位相反転は発生しません。

2.3.3 MSPM0G5187-LP

MSPM0G5187 マイコン(MCU)は、高集積で、超低消費電力の 32 ビットマイコンファミリーである MSP シリーズに属します。拡張された Arm® Cortex®-M0+ 32 ビットコアプラットフォームは、これらのマイコンのベースを形成します。このプラットフォームは、80MHz までの周波数で動作します。これらのマイコンは、コスト最適化と設計の柔軟性を両立しています。アプリケーションには、32KB ~ 128KB のフラッシュ メモリが必要です。小型パッケージは、最小で 4mm × 4mm のサイズです。ピン数の多いパッケージは、最大 64 ピンを提供します。

これらのデバイスには、エッジ AI 向け NPU アクセラレータ、サイバーセキュリティ機能、および 高性能な集積アナログ回路が搭載されています。これらのデバイスは、動作温度範囲全体にわたって優れた低消費電力性能を実現します。最大 128 KB の内蔵フラッシュ プログラム メモリを搭載しており、エラー訂正コード (ECC) が組み込まれています。最大 32KB の SRAM を搭載しており、ECC およびパリティ保護が含まれています。

フラッシュ メモリは、フィールドでのファームウェア更新をサポートするため、2 つの主要バンクに構成されています。アドレス スワップのサポートは、2 つのメインバンク間で動作します。TI の Edge AI NPU は、統合アクセラレータ モジュールとして機能します。このモジュールは、MSPM0 プラットフォームにおいて、センシング、処理、制御アプリケーション向けの高速かつ安全なエッジ AI を強化します。

柔軟なサイバーセキュリティ機能により、セキュア ブート、フィールドでの安全なファームウェア更新、IP 保護 (実行専用メモリ)、および鍵の格納がサポートされます。ハードウェア アクセラレーションは、各種 AES 対称暗号モードで動作します。このサイバーセキュリティアーキテクチャは、Arm PSA レベル 1 の認証取得を予定しています。

高性能なアナログ モジュールには、最大 26 個の外部チャネルに対応する、サンプリング方式の 12 ビット 1.6Msps ADC が含まれています。オンチップ電圧リファレンスは、1.4V または 2.5V で動作します。1 つの高速コンパレータには、内蔵 8 ビットのリファレンス DAC が含まれています。

2.3.4 LOG300

LOG300 は、低ノイズ アンプ (LNA) とログ検出ブロックから構成される、統合アナログ フロント エンド (AFE) として機能します。このデバイスは 50Hz ~ 40MHz の入力周波数範囲と 98dB (標準値) のダイナミック レンジに対応しています。LOG300 は、広いダイナミックレンジ電圧および信号測定が必要なアプリケーションに適しています。ログ検出ブロックは、シングルエンド入力および 差動入力の両方をサポートします。内蔵の LNA は入力ノイズが小さいため、最小 7µV_P の信号測定が可能です。Log_Out ピンに接続されたコンデンサを調整することで、過渡出力応答を調整します。内蔵の周波数検出機能により、入力信号の周波数およびゼロクロス情報を抽出できます。

2.3.5 UCC28881

UCC28881 は、コントローラと 14Ω、700V のパワー MOSFET を 1 つのモノリシック デバイスに統合したものです。このデバイスには、高電圧電流源も内蔵されています。これにより、整流された商用電源電圧から直接起動および動作できます。UCC28881 は UCC28880 と同じファミリーの製品で、より大きな電流に対応可能です。

このデバイスは低い静止電流により、優れた効率を実現します。UCC28881 は、降圧、昇降圧、フライバックなどの最も一般的なコンバータトポロジを構築します。これらのトポロジでは、使用する外付け部品の数が最小限です。

UCC28881 には、電力段の制御されたスタートアップ用のソフトスタート機能が組み込まれています。これにより、電力段の部品へのストレスを最小限に抑えることができます。

2.3.6 TPS709

TPS709 シリーズのリニア レギュレータは、電力に敏感なアプリケーション向けに超低静止電流を特長としています。高精度なバンド ギャップ回路と誤差アンプにより、温度範囲全体で 2% の精度が実現されます。静止電流がわずか 1µA であるため、これらのデバイスは、待機時の消費電力を最小限に抑える必要があるバッテリ駆動の常時動作システムに最適です。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。EN ピンを low に引き下げることで、シャットダウン モードが有効になります。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。

3 システム設計理論

3.1 電流センサ

PCB Rogowski コイルは、広帯域にわたる直線性と低コストを理由に選択されています。TI のデバイスは、コイルの集積性と低感度という設計上の課題を解決します。

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、磁界密度とループ面積を制御することで、Rogowski 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、外部磁界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 つのインターリープされた Rogowski 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。従来の巻線方式では、ビアをオフセットしません。本発明は、TIDA01063 と PCB Rogowski の研究による巻線トポロジへの貢献を利用してています (1)。

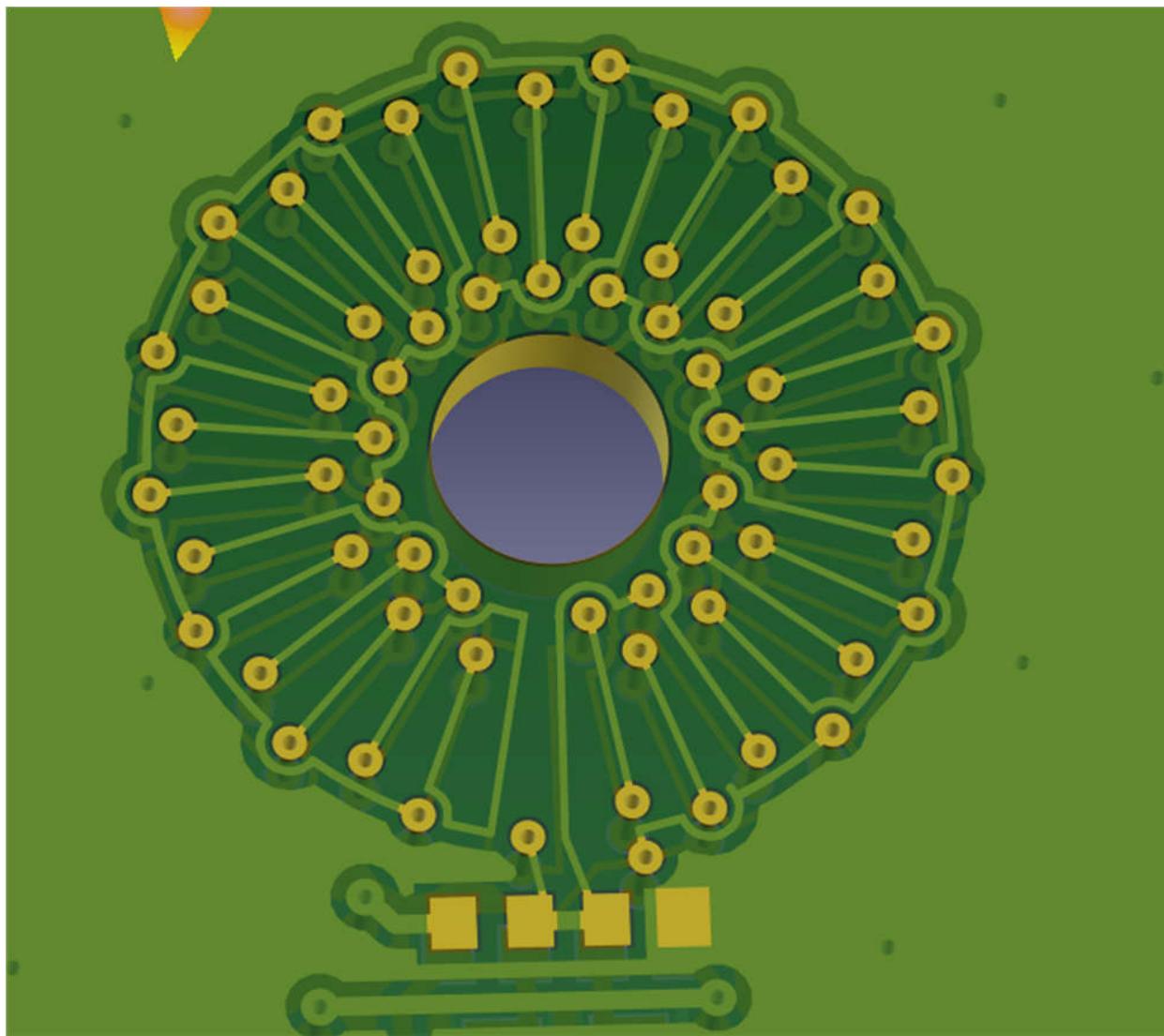


図 3-1. PCB の Rogowski 巻線のレイアウト

図 3-2 は等価回路のモデルを示しています。

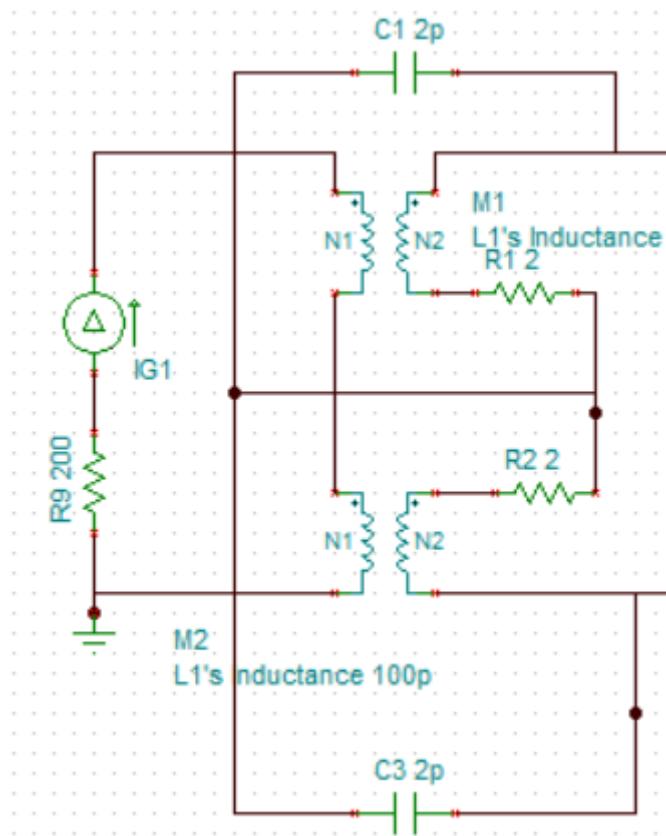


図 3-2. Rogowski コイルの TINA シミュレーションの回路図

Rogowski コイルの出力は電流の微分に等しくなります。周期的な信号については、式 1 を使用して微分を計算できます。

$$\sin(wt) = w \times \cos(wt) \quad (1)$$

これは、PCB コイルの自己共振ポイントまでのシミュレーションされた伝達関数と一致します。この小さなコイルでは、理論上の自己共振点は 40MHz を超えています。PCB Rogowski 設計の詳細については、[TIDA-010987](#) と [TIDA-01063](#) を参照してください。

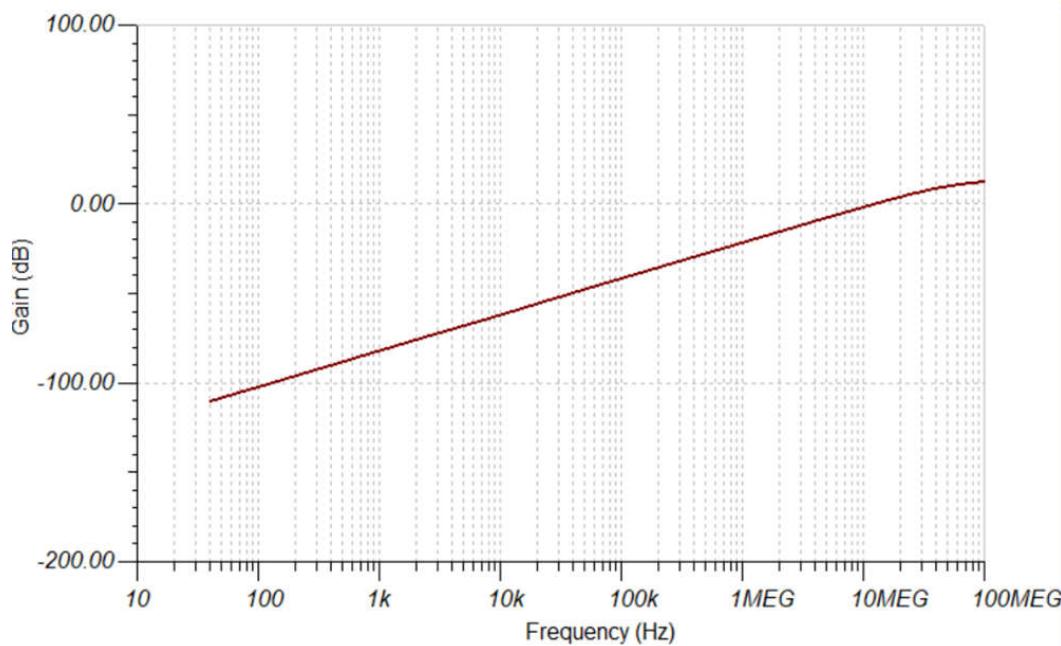


図 3-3. PCB Rogowski のシミュレーション ボード線図

3.2 ハイブリッド積分器

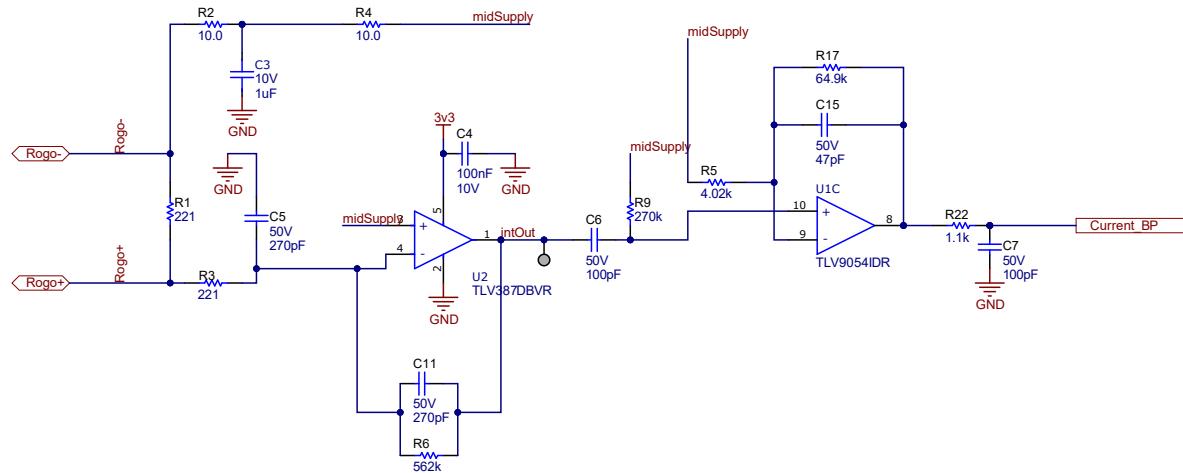


図 3-4. ハイブリッド積分器の回路図

積分器は、PCB Rogowski の帯域幅全体にわたってフラットな線形応答を提供し、低周波数領域では信号を増幅します。積分器のゲインは、DC で無限です。これにより、積分器のリセットが必要となる時間の経過とともに誤差が蓄積します。この設計では、アンプにフィードバック抵抗 R_6 を用いることで、その問題を回避しています。その後、 R_6 と R_3 は DC ゲインを設定します。

アンプノイズが積分器アンプの選択を駆動します。Rogowski の感度は、TIDA-01063 に記載の式を用いると、60Hzにおいて $4\mu\text{V}/\text{A}$ と算出されます。8nV付近のノイズにより、約 2% の精度を達成できます。Rogowski はハイパスフィルタとして機能します。周波数が高いほど、信号は大きくなります。60kHzで 1mA の信号に対し、ノイズが 4nV の場合、精度は 2% となります。同様に、60MHz での 1 μA は 2% の精度を実現します。TLV387 はこの低ノイズ要件を満たします。

積分器のコーナー周波数は、負荷信号を減衰させ、バンドパスフィルタのカットオフ特性をより鋭くするため、60Hzより高い 1kHz に設定されています。

1kHz では、開ループ ゲインは 75dB に達します。DC ゲインは 68.6dB (R6 および R3)、すなわち 2543v/v に設定されます。これは、アンプがある程度のマージンを持ってサポートするゲインの上限を表しています。この回路の位相マージンは 45.61° をシミュレーションしています。感度が $4\mu\text{V}/\text{A}$ で、ゲインが 2543v/v の場合、60Hz における積分器の出力電圧は 60Hz で $10\text{mV}/\text{A}$ となります。

アクティブ ローパス フィルタには帯域幅が制限されます。ただし、パッシブ RC フィルタによって帯域幅は拡張されます。パッシブ フィルタは、設計したアクティブ ローパス フィルタのクロスオーバー周波数においてカットオフ周波数を持つ必要があります⁽²⁾。68.6dB のゲインにより、クロスオーバー周波数は 2MHz で発生します。R3 と C5 は、積分器の帯域幅を拡張するため、カットオフ周波数が 2MHz となるように選定されています。

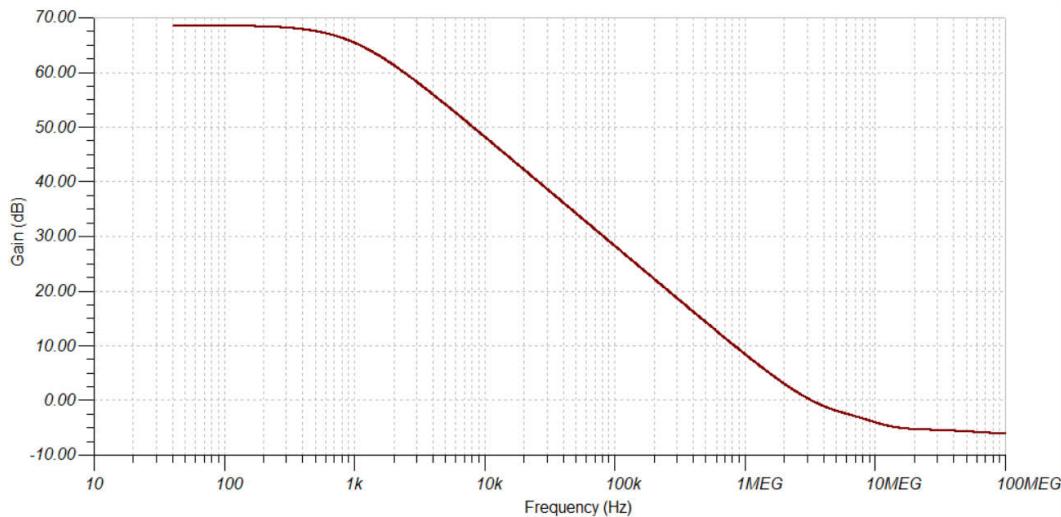


図 3-5. ローパス フィルタを内蔵

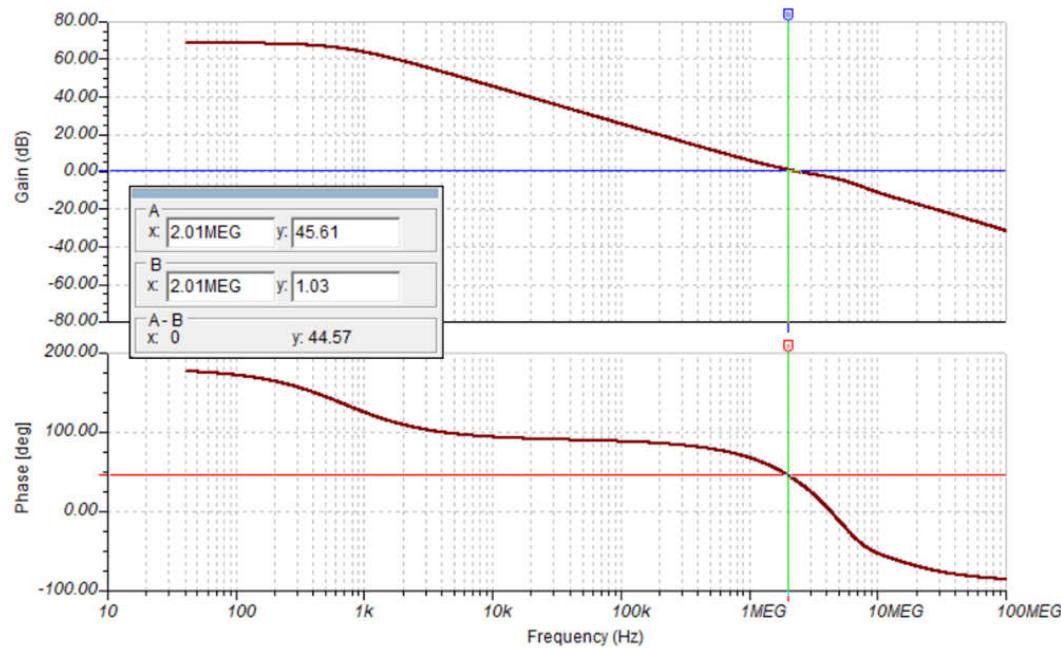


図 3-6. ローパス フィルタ後の最終的なハイブリッド 積分器の振幅と位相が追加されます

このゲインでは、入力オフセット電圧も増幅されます。0V ~ 3.3V の範囲において、信号に対するマージンを考慮しない場合の最大オフセット電圧は 1.29 mV となります。TLV387 では、最大入力オフセット電圧は $10\mu\text{V}$ に達します。これにより $\pm 25\text{mV}$ の DC オフセットが生じますが、バンドパス段のハイパス フィルタによって打ち消されます。オフセットを考慮す

ると、アンプの温度全範囲における調整後のレンジは、 $3.3V - 0.25V = 3.05V$ となります。このハイブリッド積分器でクリッピングなしに検出可能な最大電流は、次のように算出されます：

$$(\text{adjustedrange}) / (\text{gain} \times \text{sensitivity}) = 3.25V / (2543 \times 4\mu\text{V}/\text{A}) = 320\text{A} \quad (2)$$

この設計では、低ノイズと低入力オフセットを重視して **TLV387** を選択しています。これらの特性により、PCB Rogowski からの小信号を大幅に増幅できます。単一のアンプにより、このハイブリッド積分器トポロジは高帯域アプリケーションに対応できます。パッシブ RC ローパスフィルタはアンプの帯域幅を拡大します。高帯域が不要な設計では、2段構成の積分器とアンプを用いることで、**OPAx323** または **TLV905x** を使用できます。これにより、クリッピングの原因となる入力オフセット電圧は打ち消されますが、第2段のアンプによって積分器の帯域幅が制限されます。

表 3-1. アンプの比較

| アンプ | TLVx387 | OPAx323 | TLV905x |
|------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
| チャネル数 | 1、2、4 | 1、2、4 | 1、2、4 |
| ノイズ | 9nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ | 5.5nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ | 20nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| 帯域幅 | 5.7MHz | 20MHz | 5.5MHz |
| 静止時電流 | 570 μA | 1.6mA | 330 μA |
| 最大入力オフセット電圧 (-40°C~120°C) | 10 μV | 1.35mV | 2mV |
| 入力オフセット電圧(代表値) | 1 μV | 150 μV | 330 μV |

3.3 バンドパス フィルタ

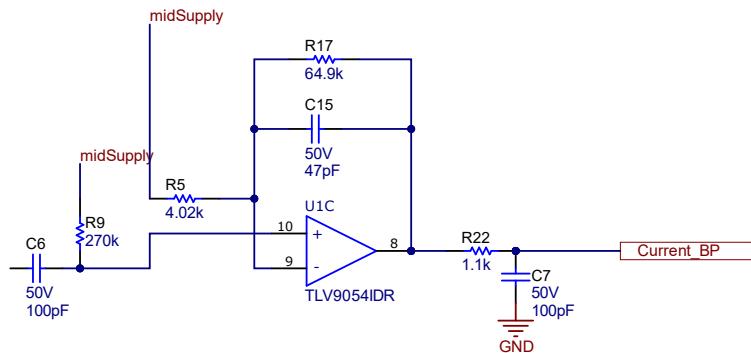


図 3-7. バンドパス フィルタ回路図

このバンドパス フィルタは、非反転の第2次バンドパス フィルタとして動作します。R9 と C6 はハイパス周波数を設定します。R5 と R17 はゲインを設定します。R17 と C15 はローパス周波数を設定します。負荷からのほとんどのエネルギーは 50Hz ~ 5kHz の範囲で発生します。このようにフィルタ処理を行うと、アーク信号の範囲が拡大します。この信号は、5kHz 以上の周波数帯域でより検出しやすくなります。上限の 50kHz の周波数帯は、デジタル信号処理の制約に基づいて選定されています。これにより、エイリアシングが低減され、オーバーサンプリングが可能になります。AI アーク故障アルゴリズムは通常、機能抽出として FFT を使用します。Arm M0+ コアでは、1024、50Hz ~ 60Hz の AC の半周期において、 2^n ステップの最大サンプル数を処理します。これは 100kHz を上回る値に相当します。

より高い周波数をフィルタリングする場合や、より高次のバンドパス フィルタを作成する場合は、**OPA4323** を検討します。

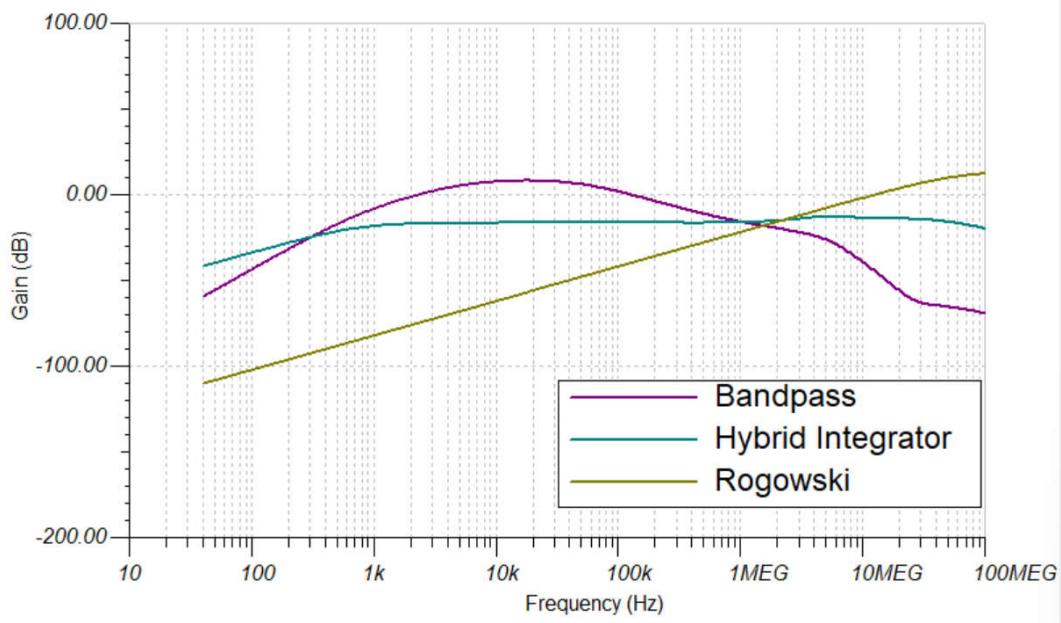


図 3-8. Rogowski、積分器、およびバンドパスを組み合わせた TINA シミュレーション

3.3.1 ログアンプ

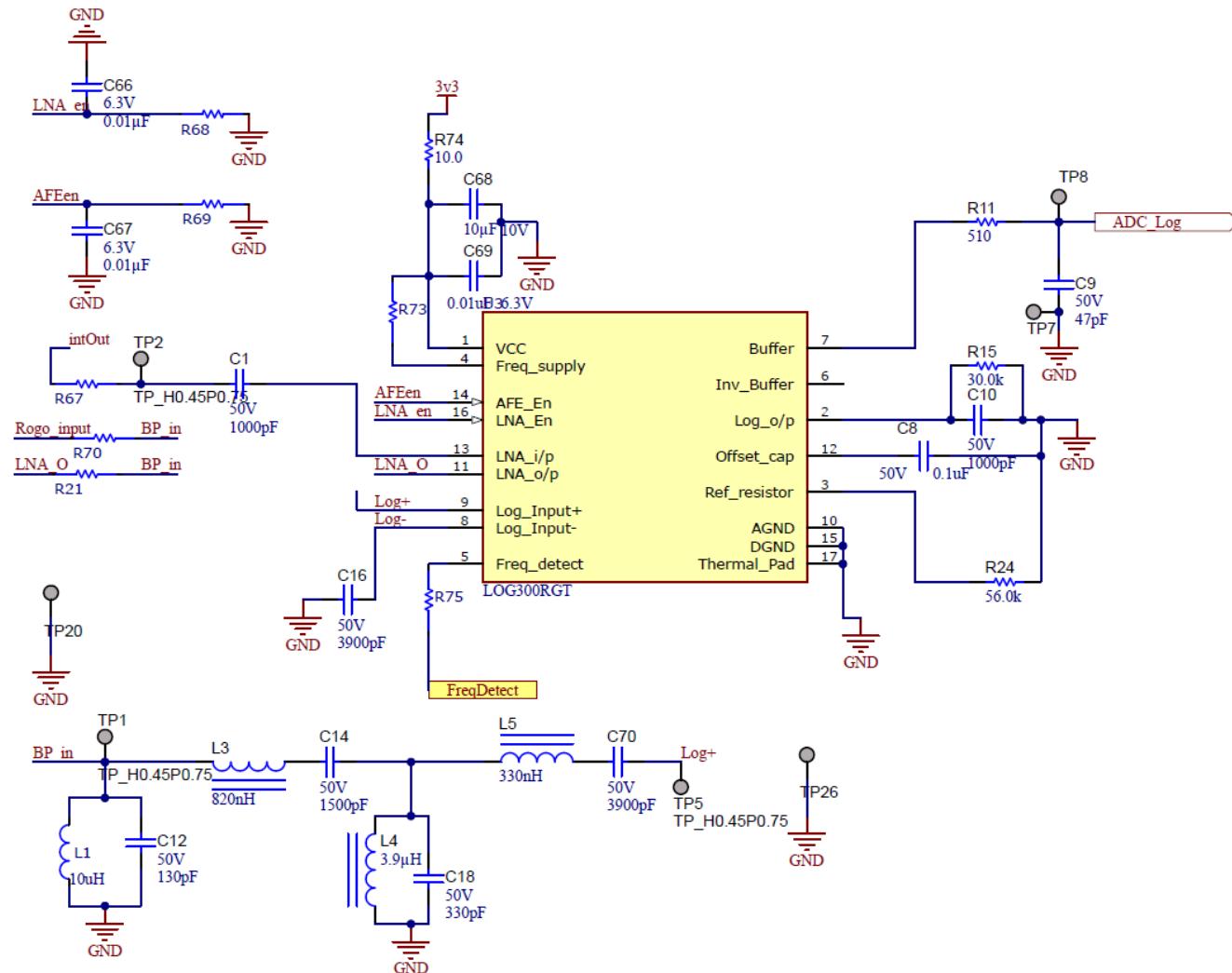


図 3-9. LOG300 の回路図

LOG300 のアナログ フロント エンドには、低ノイズ アンプ (LNA) とログ検波器が、同一の IC 内に内蔵されています。積分器の出力は LOG300 に供給され、PCB の Rogowski をバッファします。ジャンパ R70 は、PCB Rogowski を LNA に直接接続します。R68 と R69 は、電源評価のために AFE をオプションで無効にします。このバンド パス フィルタは、1MHz ~ 10MHz の第 4 次 フィルタとして動作します。10MHz の一次 バンド パス フィルタは、単一の LC ペアで構成されており、C18 に 330pF、L4 に 681nH を使用します。直列に配置されている未使用の受動部品にはジャンパを実装し、並列の LC ペアは未実装とする必要があります。4 次 フィルタと比較して、1 次 フィルタ 対数検出回路の出力には、負荷からのノイズが多く現れます。

R15 と C10 は、LOG300 出力の大きさとセトリング タイムを調整します。R15 の値を小さくすると、感度が低下します。C10 が大きいほど出力が平滑化されます。LOG300 のセットアップと評価の詳細については、データシートに記載されています。選択した R15 と C10 の値により、セトリング タイムが約 0.183ms のローパス フィルタを形成します。これにより、負荷からの標準的なノイズと比較して、アーカ エッジを検出するのに十分な詳細が得られます。

3.3.2 差動ローパス フィルタ

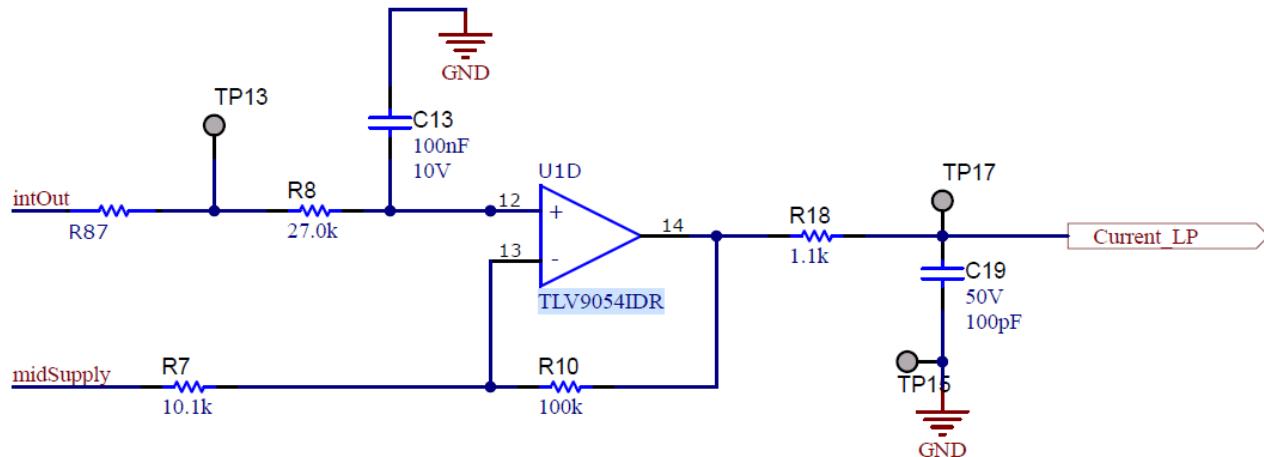


図 3-10. ローパス フィルタ回路図

このフィルタのカットオフ周波数は 59Hz です。R22 と C19 はこの周波数を調整します。R18 と R22 は、ゲインまたは減衰を設定します。このフィルタは、ライン電流の測定値を提供します。これにより、アーカ故障アルゴリズムが電流の大きさを用いて、アーカ検出の動作を調整できるようになります。このフィルタは 60Hz ~ 1kHz の信号を統合し、ハイブリッド積分器と組み合わせることで、1kHz から始まるローパスフィルタを形成します。60Hz フィルタは、約 1.54ms の 60Hz 信号に遅延を生じさせます。高周波には同じ遅延がないため、これにより歪みが発生します。

3.3.3 非絶縁型電圧センシング

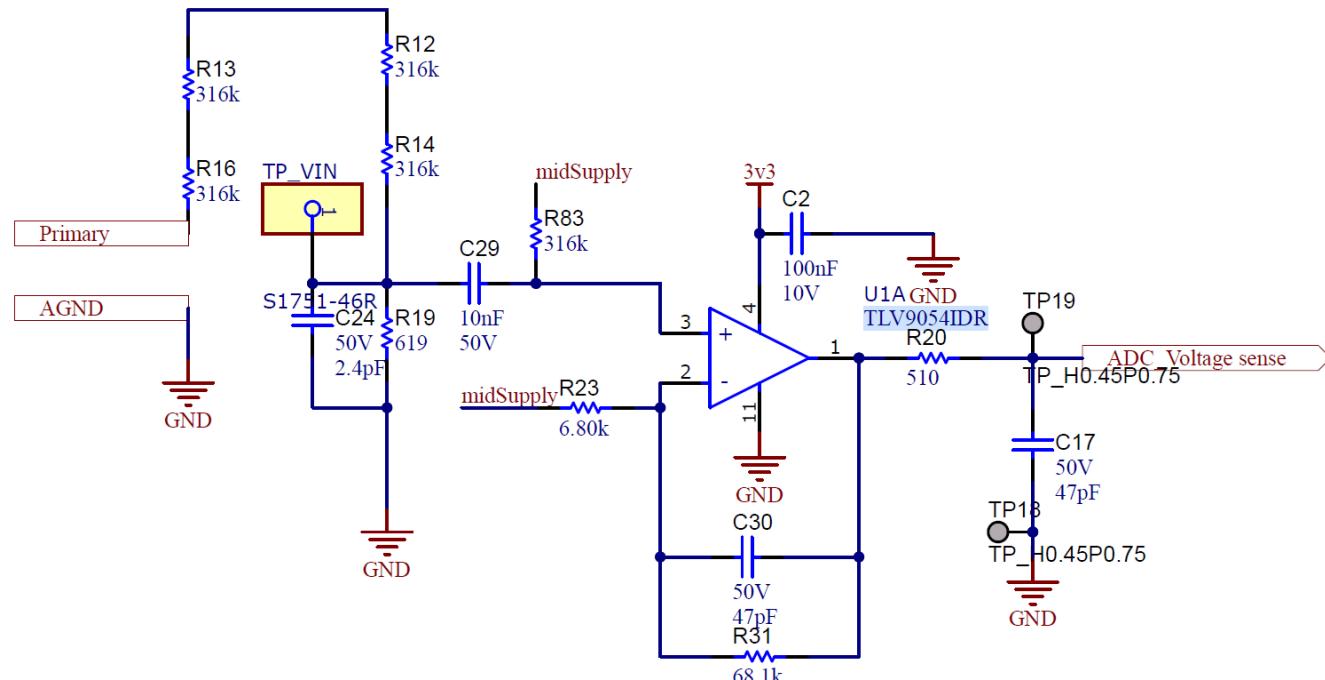


図 3-11. 電圧検出回路図

R12、R13、R14、R16、R19 は分圧器を形成し、電圧を降下させます。C24 と C30 は未実装ですが、ある程度のローパス フィルタリングを行うために配置することもできます。C29 と R83 は 50Hz のハイパス フィルタを形成し、信号を容量結

合とともに、ミッドサプライのリファレンス電位を中心に配置します。これは、電流のローパス出力と組み合わせることで、簡易的な電力測定を可能にします。アーク検出では、低周波数帯の変動は電力系統によってほぼ安定化されるため、より高いカットオフ周波数が有効です。

3.3.4 自動ラベリング回路

アークラベリング回路は、2つの絶縁アンプと、1つの絶縁コンパレータで構成されています。アークラベリング回路は、制御された実験室環境でアークのシグネチャを収集し、ラベリングします。この設計では、実験室環境では AC ライン電圧とアークギャップ電圧の両方が利用可能であり、現場環境ではそれができないという点を活用しています。図 4-2 に、ラボでの代表的なアークテスト構成を示します。アークジェネレータは、異なる動作条件下で再現性のあるアークを生成します。アークジェネレータで測定されるアークギャップ電圧とライン電圧との関係は、アーク発生の指標として用いられます。この情報は、その後、標準的なアーク検出信号チェーンでサンプリングされたデータのラベリングに用いられます。ラベリングされたデータは、その後、組み込み AI モデルの学習に用いられます。このボードの該当部分は、対応する TI LaunchPad 開発キットと連携して動作し、LaunchPad の 3V3 出力から電源の供給を受けます。MSPM0 SDK には、LaunchPad から接続されたコンピュータへデータを転送するためのソフトウェア例が含まれています。

3.3.4.1 ライン電圧検出

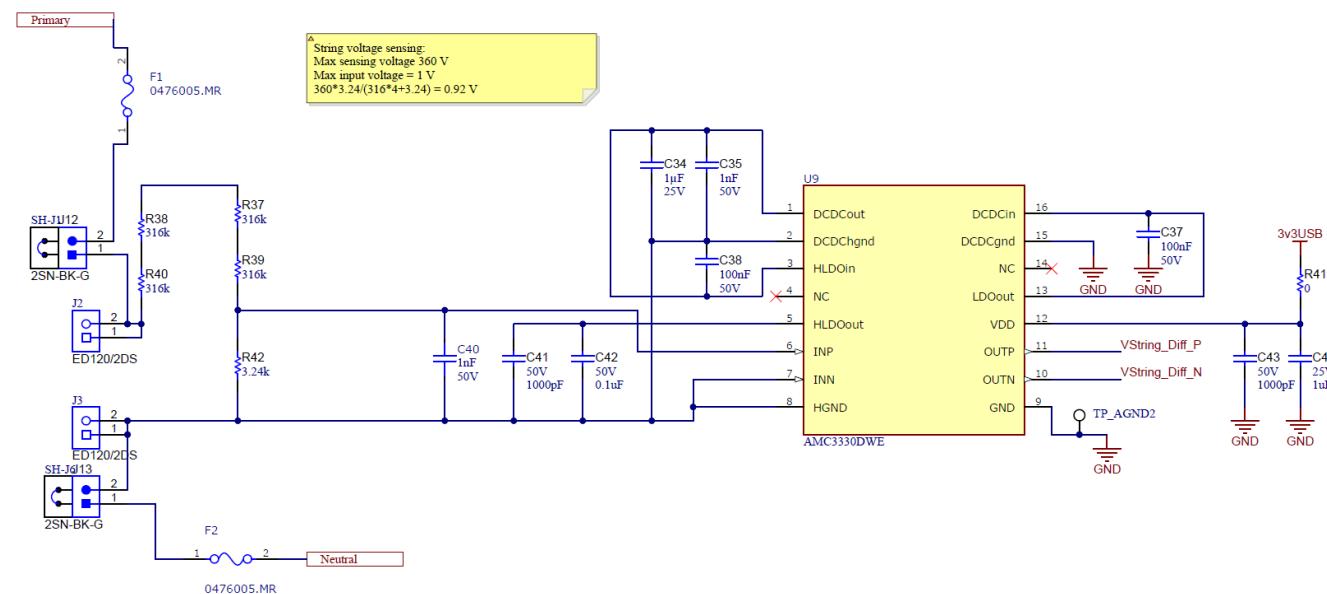


図 3-12. 絶縁ライン電圧検出回路図

図 3-12 はライン電圧検出回路を示しています。この回路は、AMC3330 に接続された抵抗分圧回路と、固定ゲイン 2.0V/V の強化絶縁アンプで構成されています。AMC3330 の差動出力は、セクション 3.1.7.3 で説明されている回路に接続されます。この差動からシングルエンドへの変換で、1.65V/V のゲインが発生します。その後、変換後の出力はマイコンの内蔵 ADC に接続されます。

式 3 は、J2 と J3 の間の入力電圧と、差動からシングルエンドへの変換の出力電圧との関係を表しています：

$$V_{out} = V_{in} \times 3240\Omega / (4 \times 316000\Omega + 3240\Omega) \cong V_{in} \times 0.00256 \quad (3)$$

3.3.4.2 アークギャップ電圧センシング

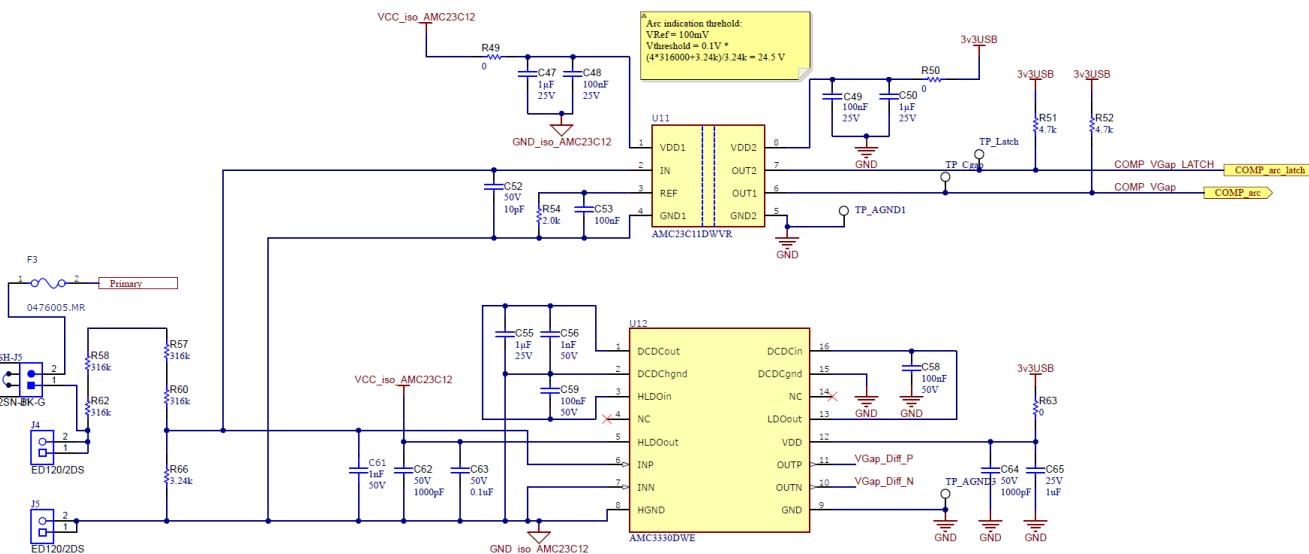


図 3-13. アークギャップ電圧センシング

アーケギャップ電圧を検出するために、ライン電圧検出と同じ回路が動作します。さらに、絶縁コンパレータ AMC23C11 により、アーケギャップ電圧がスレッショルドを超えたかどうかが示されます。R54 はこのスレッショルドをプログラムします。AMC23C11 の REF ピンには $100\mu\text{A}$ の電流源が実装されており、スレッショルド電圧を生成します。R54 を 1000Ω に設定することで、REF ピンには 200mV の電圧が生成されます。これは、 24.5V の入力電圧に相当します。既存の回路図では 120VAC が設定されます。 240VAC では、同等の動作を得るために、より小さいバーデン抵抗 R86 (約 $1.62\text{k}\Omega$) と、スレッショルド設定用の R54 (約 500Ω) が必要です。

3.3.4.3 差動→シングルエンド変換

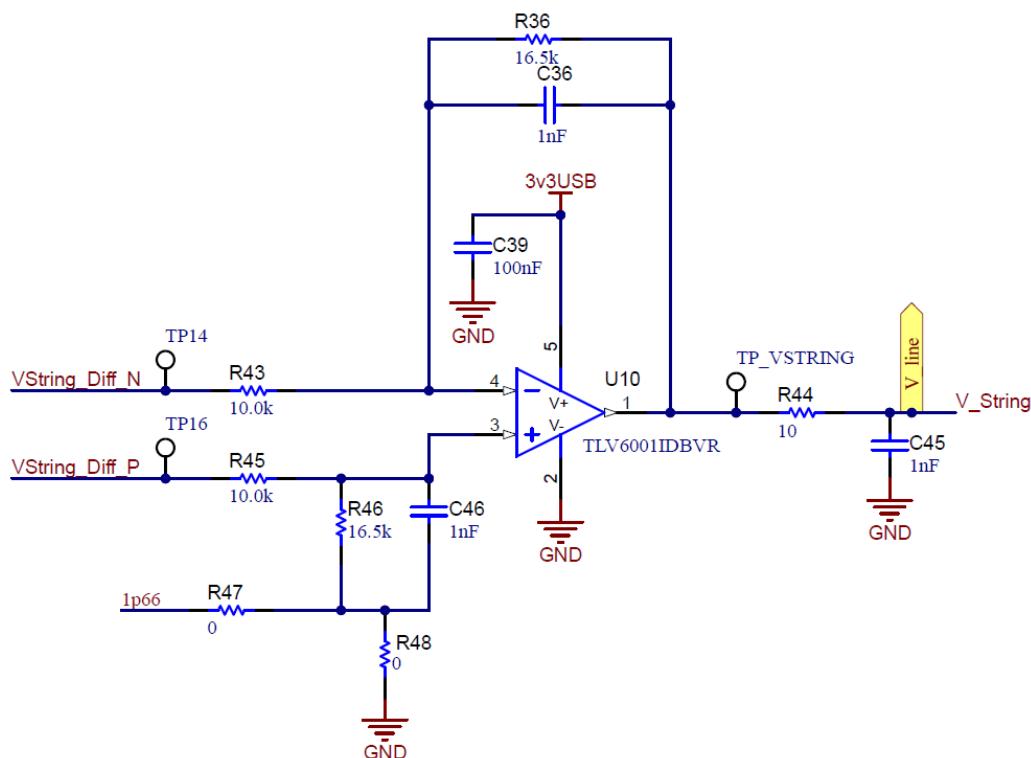


図 3-14. 差動からシングルエンドへの回路図

2つの電圧センシング パスに使用する AMC3330 は、差動信号出力を備えています。この信号を LaunchPad マイコンのシングルエンド ADC に接続するため、TLV6001 を使用して変換段を実装しています。テキサス・インスツルメンツ、『[差動出力\(絶縁型\)アンプからシングルエンド入力ADCへの接続](#)』アプリケーション ブリーフも参照してください。回路が双方向で動作するため、R65 は未実装のままとなっています。この変換段のゲインは、R55 と R53、および R59 と R61 の関係によって設定されます。AMC3330 の最大出力が 2V、ADC の最大入力が 3.3V であるため、1.65 のゲインが使用されています。

3.3.5 電源

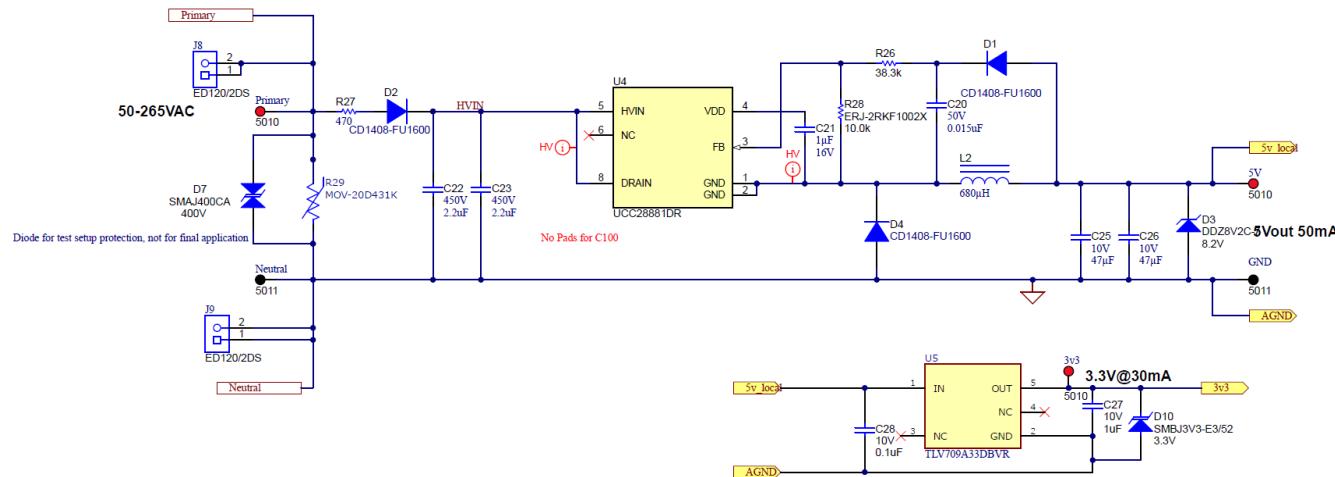


図 3-15. 電源回路図

この補助電源は、110V ~ 250VAC の入力で動作し、安定した 3.3V レールを供給します。UCC28881 オフライン スイッチは電圧を降圧します。負荷が接続されていない場合、5V レールは 5V を超えて上昇し、D3 によって 8.2V に制限されます。MOV R29 とダイオード D7 に過電圧保護機能が追加されています。この電源は、基板のアナログ部分をテストしますが、オプションのままです。LaunchPad 接続でデータ転送が処理されるため、3V3 レールはボードの自動ラベリング部分には電力を供給しません。110V ~ 250VAC の入力に電力が供給されていない場合、LaunchPad の 5V レールが切り替えられて、LDO U5 への入力として供給されます。

4 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、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. コネクタおよび Rogowski コイルに最大 12AWG の電線を使用
2. 高電圧安全ボックス (テスト前の [警告](#) を参照)
3. アーク ジェネレータ試験セットアップ
4. オシロスコープ
5. 信号ジェネレータ
6. データ収集用パーソナル コンピュータ
7. 互換性のある LaunchPad (MSPM0G5187-LP)
 - a. LaunchPad 用 USB ケーブル (USB® Type-C)
 - b. USB-USB 絶縁ケーブル
8. AC 電源
9. 定格 1500 W、 12Ω の電力抵抗
10. AC 負荷

4.2 ソフトウェア

MSPM0SDK とエッジ AI Studio のリンクを参照してください。

4.3 テスト設定

ボードに電源を投入する前に、すべての接続が確実にねじ止めされていること、および LaunchPad がリファレンス デザインと同じグランド端子および電源端子に接続されていることを確認してください。まず、高電圧テストの前にアナログ シグナル チェーンを検証します。

1. [図 2-2](#) と [セクション 2.1](#) の接続に従って、LaunchPad をボード下のインターフェイスに接続します：

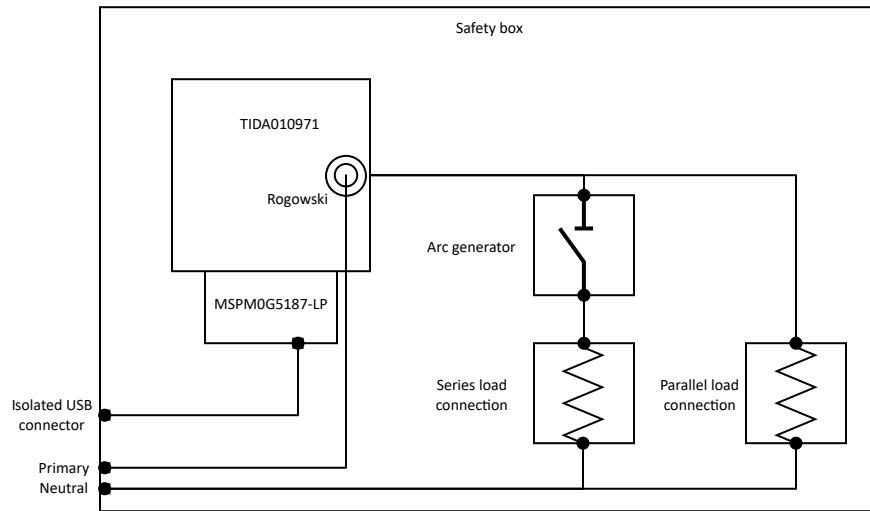


図 4-1. テスト設定図

2. 被覆付きの 12AWG 電線を Rogowski コイルに通し、AC 電源および 定格 50W 超の 12Ω 電力抵抗を並列負荷接続部に接続します。
3. USB ケーブルを USB 電源と LaunchPad に接続します。電源投入時に、LED D6 が青色に点灯することを確認します。

4. テストピンには、*Current-LPF* および *LOG* というラベルが付けられています。最初は低電圧条件で試験し、12 VAC、1A、60Hz の負荷を使用します。ローパスおよびバンドパスフィルタの入力は、オシロスコープで AC 結合します。

- 電流 *LPF* 出力がピークツーピーク 134mV であることを確認します
- 積分器の出力がピークツーピーク 15mV であることを確認します
- LOG*: 出力が 900mV であることを確認します。これは環境ノイズによって変動する可能性があります。

4.3.1 アークテスト設定

アークテストには、図 4-1 からの接続に従ってください。

アークテストに使用した追加の機器:

- UL1699 で定義されているアークジェネレータ
- 12AWG ワイヤ
- 定格電力に対応する抵抗性負荷
- Nema 5-15p プラグ

データ収集またはアーク検出用のソフトウェアおよびユーザー ガイドは、いずれも **MSPM0 SDK** で提供されています。

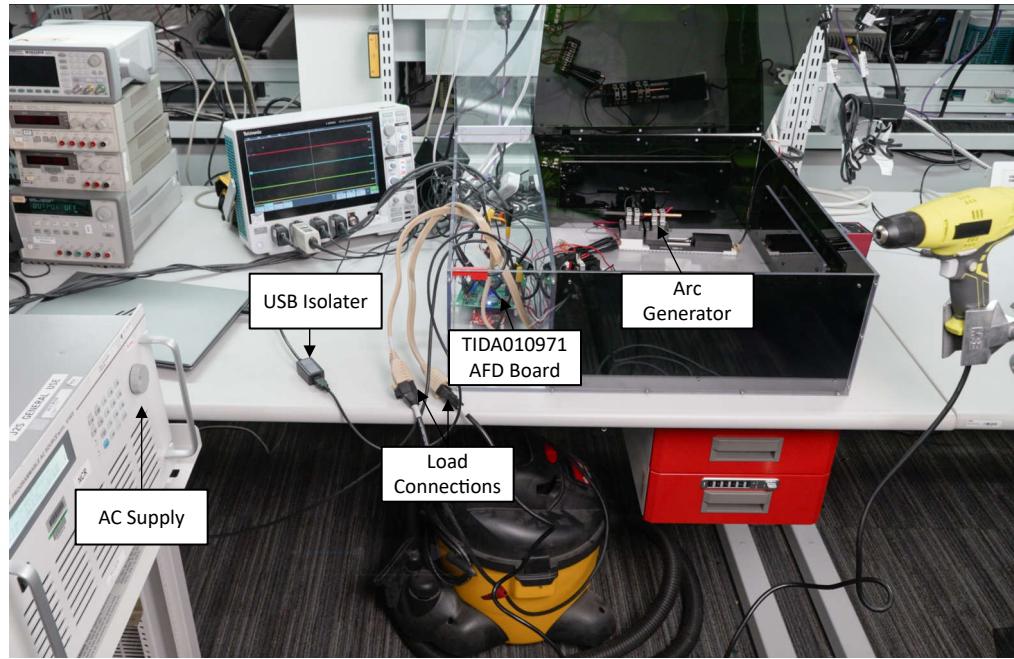


図 4-2. アークジェネレータ試験セットアップ

4.4 テスト結果

セクション 3.1.3 のバンドパスフィルタの伝達関数を、図 4-3 に示します。信号ジェネレータからの AC 入力を、積分器の出力パターンから分離した C6 の入力に注入します。バンドパスフィルタの出力は、オシロスコープの高帯域パッシブ プローブを使用して R22 の出力で測定します。

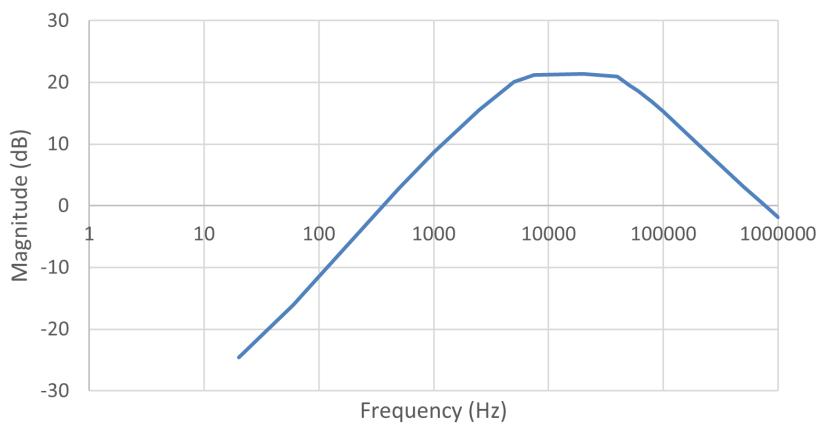


図 4-3. 電流バンド パス フィルタの振幅プロット

図 4-4 に、バンドパス出力ノイズを示します。このノイズは、12 ビット、3.3V ADC の分解能未満です。

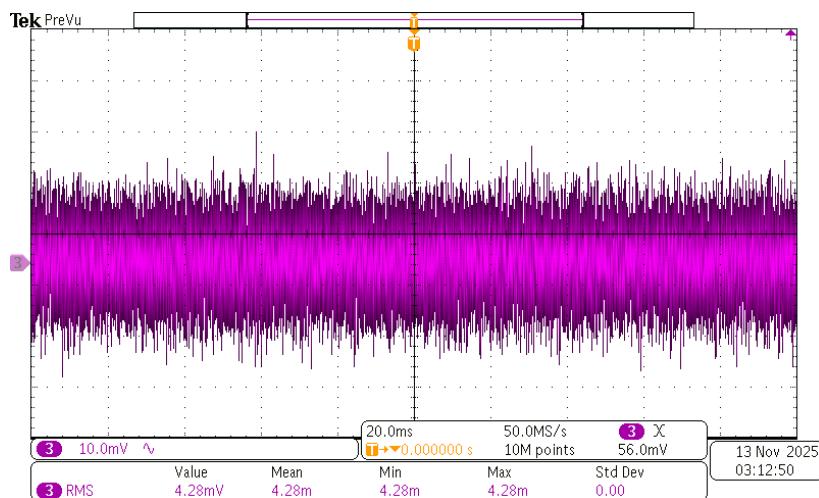


図 4-4. バンドパス フィルタの出力ノイズ

図 4-5 に、抵抗性負荷が 9.74A のローパス フィルタの出力を示します。RMS 電圧は式 4 に対応します。

$$472\text{mV}/9.74\text{A} = 180\text{mV/A} \quad (4)$$

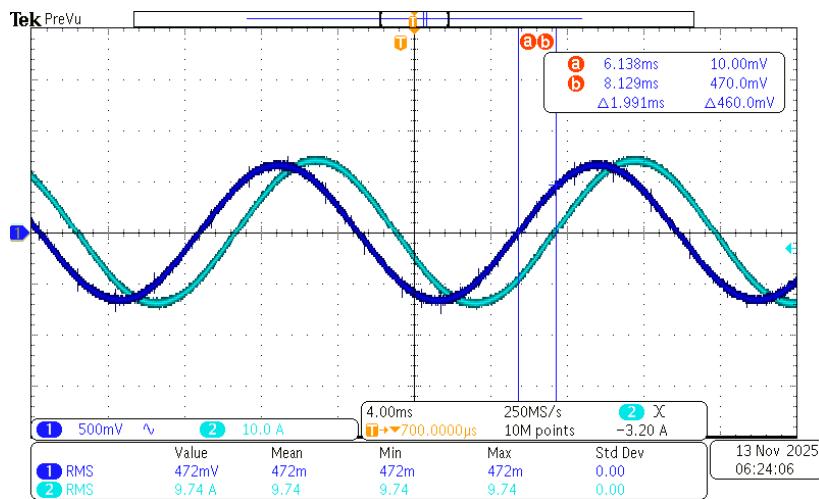


図 4-5. 抵抗性負荷付きのローパス フィルタ出力

図 4-6 と図 4-7 に、2 つの異なる負荷での通常モードとアーク放電の LOG300 出力を示します。これは、アーク信号が 1MHz ~ 10MHz の範囲まで到達する一方で、負荷からのノイズが大幅に低減されることを示しています。図 4-6 と図 4-7 の場合、上のサブプロットは LOG300 の出力、下のサブプロットはオシロスコープの電流プローブの出力を示しています。

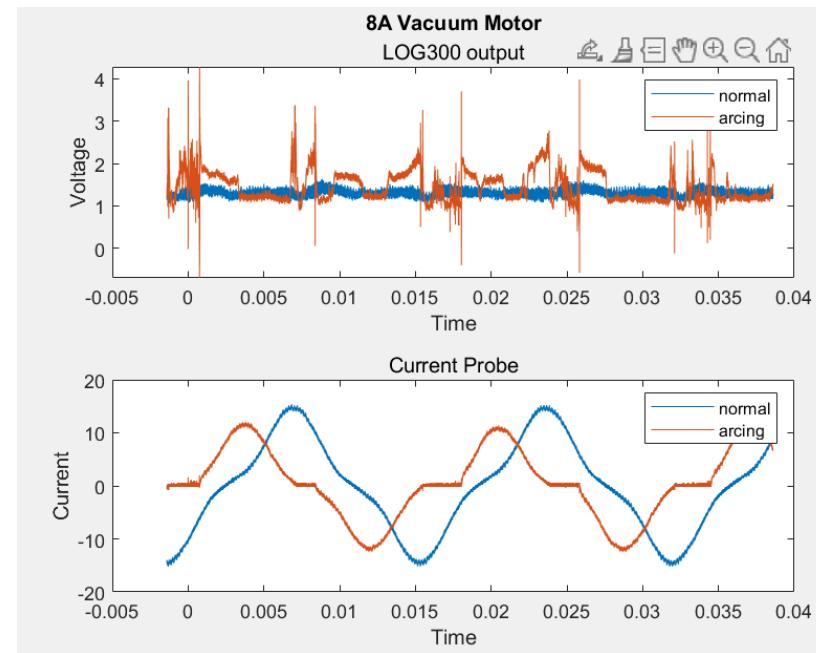


図 4-6. 真空モータ負荷 - 上部: LOG300 下部: 電流プローブ

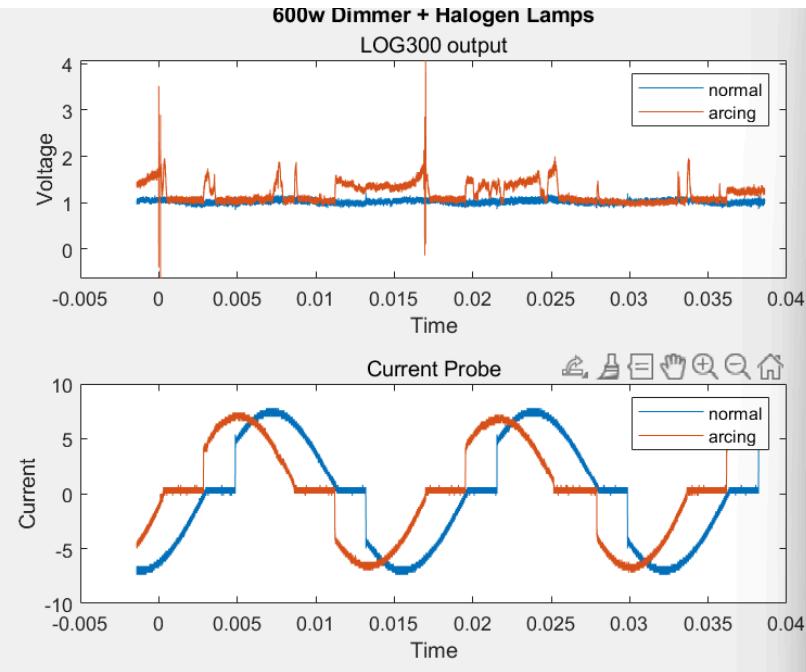


図 4-7. 600W タングステンランプ、ディマ負荷付き - 上部: LOG300 下部: 電流プローブ

5 設計とドキュメントのサポート

5.1 デザイン ファイル

デザイン ファイルをダウンロードするには、[TIDA-010971](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDA-010971](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.2 BOM

部品表 (BOM) をダウンロードするには、[TIDA-010971](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.2 ツールとソフトウェア

ツール

| | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| LP-MSPM0G5187 | MSPM0G5187 LaunchPad™ 開発キットの評価基板 |
| CCSTUDIO | Code Composer Studio™ 統合開発環境 (IDE) |

ソフトウェア

| | |
|---|---|
| MSPM0-SDK | MSPM0 ソフトウェア開発キット (SDK) |
| TI Resource Explorer Software | TI Resource Explorer 内の TI Resource Explorer ソフトウェア パッケージ |
| EDGE-AI-STUDIO | エッジ AI 向け、ソフトウェア開発ツール |

5.3 ドキュメントのサポート

1. Fritz, J. N., Neeb, C., De Doncker, R. W.(2015 年 1 月).[高帯域幅および dv/dt 耐性を特長とする、非侵襲型電流測定用 PCB 集積差動 Rogowski コイル](#)。ResearchGate<https://www.researchgate.net/publication/302567997> から取得
2. Xue, Y., Lu, J., Wang, Z., Tolbert, L.M., Blalock, B.J., Wang F. (2014) [並列接続されたシリコン カーバイド MOSFET のアクティブ電流バランスング向け小型平面 Rogowski コイル電流センサ](#)。2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)。IEEE, 2014。<https://ieeexplore.ieee.org/document/6954042> から取得
3. テキサス インスツルメンツ、[TLVx387 高精度、ゼロドリフト、低入力バイアス電流オペアンプ](#)データシート
4. テキサス インスツルメンツ、[TLVx387 高精度、ゼロドリフト、低入力バイアス電流オペアンプ](#)データシート
5. テキサス・インスツルメンツ、[AMC3330 DC/DC コンバータ内蔵、高精度、±1V 入力、強化絶縁型アンプ](#)データシート
6. テキサス・インスツルメンツ、[AMC23C11 可変閾値電圧、ラッチ機能を有する高速応答、強化絶縁型コンパレータ](#)データシート
7. テキサス インスツルメンツ、[MSPM0G5187-LP ユーザーガイド](#)

5.4 サポート・リソース

テキサス・インスツルメンツ E2E™ サポート・フォーラムは、エンジニアが検証済みの回答と設計に関するヒントをエキスパートから迅速かつ直接得ることができる場所です。既存の回答を検索したり、独自の質問をしたりすることで、設計で必要な支援を迅速に得ることができます。

リンクされているコンテンツは、各寄稿者により「現状のまま」提供されるものです。これらはテキサス・インスツルメンツの仕様を構成するものではなく、必ずしもテキサス・インスツルメンツの見解を反映したものではありません。テキサス・インスツルメンツの[使用条件](#)を参照してください。

5.5 商標

LaunchPad™, テキサス・インスツルメンツの™, Code Composer Studio™, and テキサス・インスツルメンツ E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

USB® is a registered trademark of USB Implementers Forum.

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

NATHAN NOHR は、ダラスに拠点を置くテキサス インstrumentのエネルギー インフラ分野を担当するシステム エンジニアです。Nathan は故障検出およびスマート回路ブレーカに注力しています。彼は、ミシガン大学で電気コンピュータ工学の修士号を取得しました。

重要なお知らせと免責事項

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

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

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

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

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

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月