



Circuits from the Lab™ 実用回路は今日のアナログ・ミックスド・シグナル、RF 回路の設計上の課題の解決に役立つ迅速で容易なシステム統合を行うために作製、テストされました。詳しい情報と支援は www.analog.com/jp/CN0280 をご覧ください。

接続/参考にしたデバイス	
AD7401A	絶縁型シグマ・デルタ ($\Sigma\Delta$) 変調器
AD8639	オートゼロ、レール to レール出力、デュアル、オペアンプ
ADuM6000	5kV 絶縁 DC/DC コンバータ
ADM8829	スイッチド・キャパシタ式電圧インバータ
ADP121	150 mA、低静止電流の CMOS リニア・レギュレータ
ADP7104	20 V、500 mA、低ノイズ CMOS LDO
ADP7182	-30V、-200mA、低ノイズリニア・レギュレータ

絶縁型電源を備えた太陽光発電コンバータ用の堅牢な完全絶縁電流検出回路

評価および設計サポート

設計と統合ファイル

[回路図](#)、[レイアウト・ファイル](#)、[部品表](#)

回路の機能とその利点

図 1 に示す回路は、絶縁型電源を備えた完全絶縁電流検出回路です。極めて堅牢なこの回路は、検出抵抗の近くに配置し、ノイズのピックアップを最小限に抑えて正確な測定を行うことができます。出力はシグマ・デルタ変調器からの 16MHz シングル・ビット・ストリームで、これは DSP により SINC³ デジタル・フィルタを使って処理されます。

この回路はピーク AC 電流が数百ボルトで、電流が数 mA から 25A まで変化する太陽光発電 (PV) コンバータの AC 電流のモニタリングに最適です。

回路説明

この回路は、2 個の AD8639 低オフセット・アンプを使用することにより、1m Ω の検出抵抗を使って最大 $\pm 25A$ のピーク電流を測定します。AD7401A シグマ・デルタ変調器のフルスケール・レンジを利用できるように、このアンプのゲインは 10 に設定されています。必要に応じてこのゲインを下げれば、より高い電流値を測定でき (最大 $\pm 50A$ または $\pm 100A$)、AD7401A のフルスケール入力レンジを使用して最大限の利点を得ることができます。

1m Ω の抵抗に $\pm 25A$ の電流が流れると、 $\pm 25mV$ の電圧が生じます。これが AD8639 によって $\pm 250mV$ まで増幅さ

れ、AD7401A に入力されます。3 個のオペアンプを使用した従来の計装アンプ構成では、AD7401A の差動入力が差動アンプとして機能します。

AD8639 の標準のオフセット電圧はわずか 3 μV 、ドリフトは 0.01 $\mu V/^\circ C$ 、ノイズは 1.2 μV p-p (0.1Hz~10Hz) なので、DC 誤差源を最小限に抑える必要があるアプリケーションに最適です。ソーラー・パネルのアプリケーションでは、全動作温度範囲にわたりドリフトがほぼゼロであることが大きな利点となります。多くのシステムでは、AD8639 のレール to レール出力振幅により、最大限の信号対ノイズ比 (SNR) を得ることができます。

電流測定回路の周囲には、この敏感な低電圧領域にリーク電流が流れ込むのを防ぐためにガード・リングが使われています。BAT54 ショットキー・ダイオードは、AD8639 の入力を過渡過電圧や ESD から保護します。単極 RC フィルタ (102 Ω 、1nF) は 1.56MHz の差動モード帯域幅を持ち、AD7401A の入力の広帯域ノイズを減らします。

シグマ・デルタ変調器には、DSP プロセッサや FPGA などの外部ソースからのクロック入力が必要です。クロック周波数は 5MHz~20MHz の範囲が可能です。図 1 の回路では 16MHz の周波数を使用しています。変調器のシングル・ビット・ストリーム出力は非常に堅牢で、SINC³ フィルタで直接処理でき、データを ADC ワードに変換できます。

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本誌記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。※日本語資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

©2013 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. 0

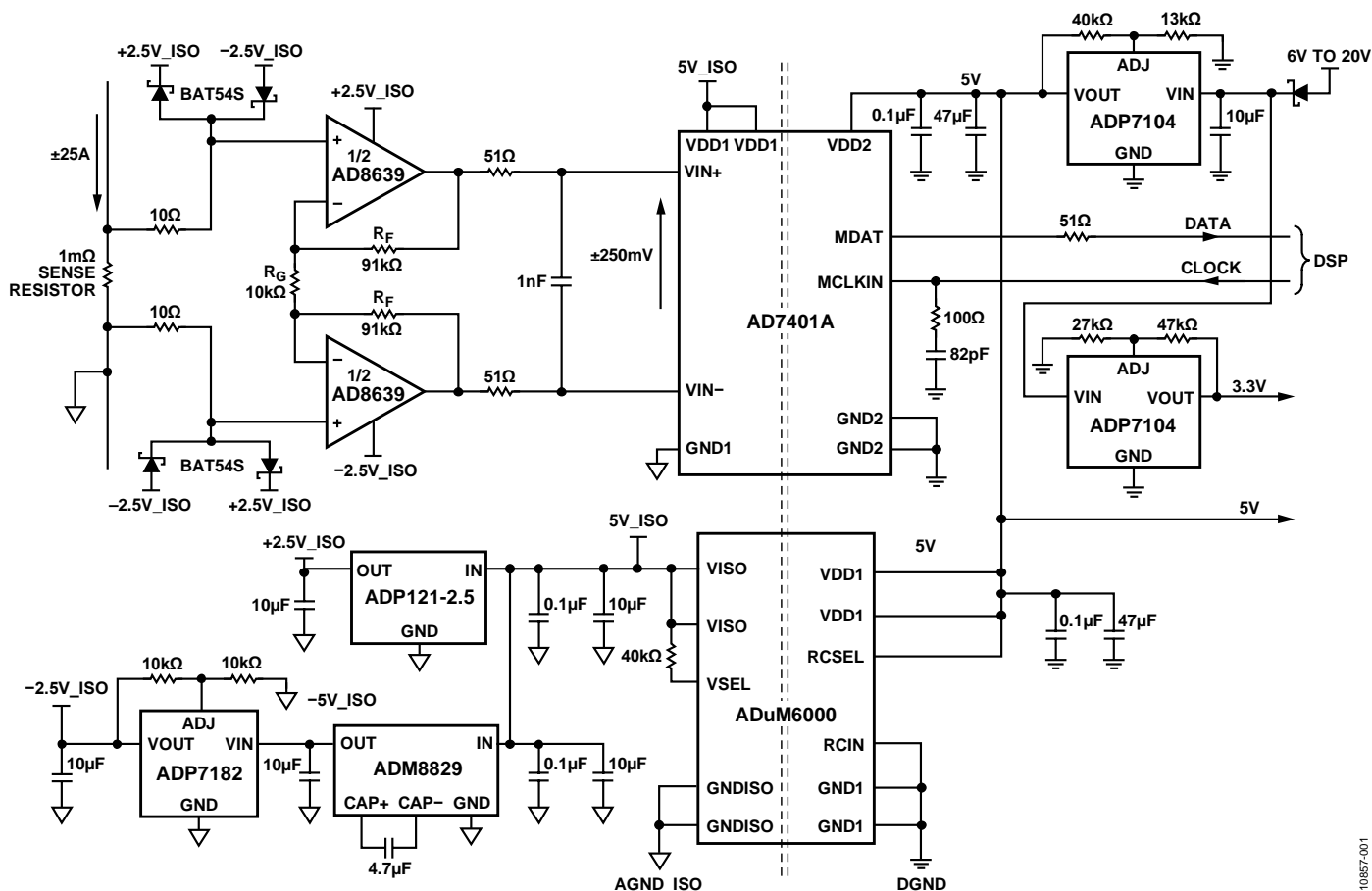


図 1. 絶縁電流検出回路（簡易回路図：全ての接続およびデカップリングは示されていません）

AD740x デバイスを使用して AC と DC の両方のデータを解析できるので、AC 性能だけでなく、システム内の DC 注入もモニターすることができます。ソーラー・アプリケーションでは DC 注入が重要です。電力網に注入される DC 電流が多すぎると、その経路内にあるあらゆるトランスが飽和してしまうからです。したがって、DC 電流は低 mA レンジに抑えなければなりません。

AD740x デバイスを使用する大きな利点は、実際の AC 電流経路のすぐ近くに配置できることです。DSP や FPGA では十分な距離を取らねばならず、場合によってはシステム内の別のボード上に配置しなければならないこともあります。これは、EMI/RFI の影響を最小限に抑えることによって、システム全体の精度を向上させます。

安全は 20μm のポリアミド製絶縁バリアを使用することで確保されています。このことと各種承認に関する詳細情報は、各デバイスのデータシートに記載されています。AD7401A は表 1 に示すように、絶縁バリアを介してユニポーラ範囲で 891V まで、バイポーラ範囲で 565V の電圧まで使用できます。

表 1. AD7401A の最大連続動作電圧¹

パラメータ	最大	単位	制約
AC 電圧、 バイポーラ波形	565	V peak	最小寿命時間 50 年
AC 電圧、 ユニポーラ波形	891	V peak	CSA/VDE 承認最大 使用電圧
DC 電圧	891	V	CSA/VDE 承認最大 使用電圧

¹ 絶縁バリアに加わる連続電圧の大きさを意味します。詳細については、AD7401A のデータシートを参照してください。

電源構成

ADuM6000は5Vの絶縁型DC/DCコンバータで、絶縁バリアを介して5V DC電源を駆動するために、625kHzの内部PWMを使用して動作します。整流はバリアの絶縁側で行われ、さらにフィルタがかけられます。

AD8639 オペアンプの電源は、ノイズ性能を向上させるために±2.5Vに安定化されます。+2.5Vは、+5Vの絶縁型電源によって駆動される低ノイズのADP121低ドロップアウト・レギュレータから供給されます。

ADM8829スイッチド・キャパシタ電圧インバータは絶縁型の+5V電源によって駆動され、-5Vの出力を生成します。この出力は、ADP7182負電圧リニア・レギュレータを使用して-2.5Vに安定化されます。

動作原理

AD7401Aは2次シグマ・デルタ($\Sigma\Delta$)変調器で、アナログ入力信号を高速の1ビット・データストリームに変換します。このデータストリームはアナログ・デバイセズのiCoupler®技術を用いて内部でデジタル絶縁されています。AD7401Aは5V電源で動作し、±250mV(±320mVフルスケール)の差動入力信号に対応しています。アナログ変調器を使用しているため、外付けのサンプル&ホールド回路は必要ありません。この変調器は、アナログ入力を連続的にサンプリングします。入力信号の情報は、最大20MHzのデータ・レートを持つ1ビット信号の密度として、出力のストリームに含まれます。オリジナル情報は、適切なデジタル・フィルタによって再構築されます。プロセッサ側(非絶縁側)には、5Vまたは3V電源(VDD2)を使用できます。

ソーラー・アプリケーションの電流測定には、絶縁型の測定手法が必要です。アナログ・デバイセズの製品には、AC測定にこのような絶縁アプリケーションを使用できるものが数多くあり、AD7401Aもその1つです。この種の絶縁はiCoupler®技術に基づいています。

電流トランスを使用すれば別の絶縁方法が可能で、これはガルバニック絶縁と呼ばれます。

この回路ノートでは、AD7401AとADuM6000を使用してアナログ・デバイセズが設計した電流測定モジュールの標準性能について述べます。

太陽光発電(PV)インバータ・システム・アプリケーション

太陽光PVインバータはソーラーパネルの電力を変換し、その電力を電力網に効率的に転送します。ソーラーパネルは基本的にDC電流源ですが、その電力をAC電流に変換して、電力網の周波数に同期させ、極めて高い効率レベル(95%~98%)で電力網に送ります。変換は、図2に示すように1つ以上の段階を経て行うことができます。通常、第1段はDC/DC変換で、低電圧大電流のソーラーパネル出力を高電圧低電流に変換します。これは電力網のピーク電圧に相当するレベルまで電圧を上げるためです。第2段では通常、Hブリッジ回路を使用して、DC電圧と電流をAC電圧と電流に変換します(Analog

Dialogueの記事:太陽光発電システムとスマートグリッドの統合化を支えるアイソレーション技術を参照)。

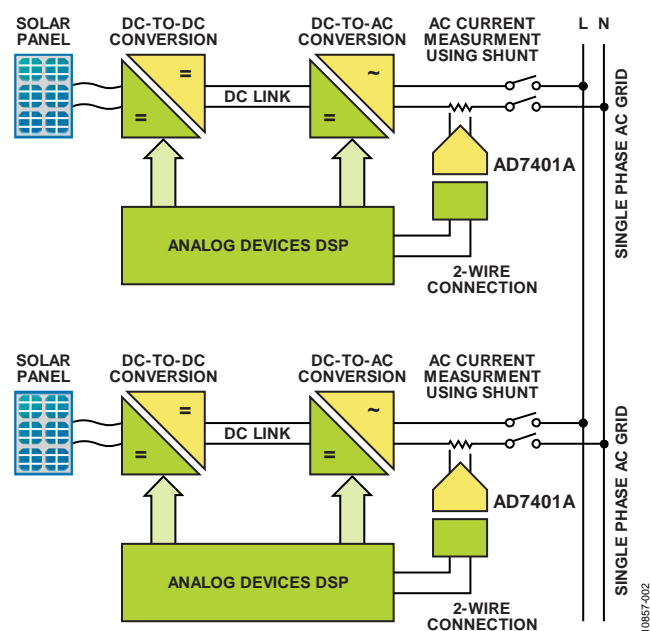


図2. 太陽光 PV インバータ・システム

これまでの太陽光PVインバータは、電力を電力網に放出する単純なモジュールでした。新設計のソーラー・インバータでは安全、電力網との統合化、コスト削減が重視されています。これらの目標の実現に向け太陽光PVインバータの設計者は、性能を改善してコスト削減の可能性を追求するために、既存のソーラー・インバータ・モジュールには使われていない新技術に着目しています。

この回路では、DSPがDC/DCコンバータとDC/ACコンバータを制御しています。電力網への接続は通常、リレーを介して行われます。AC電流測定はAD7401Aによって行われます。このデバイスは電力網への電流出力(標準25A)を測定します。

太陽光PVインバータ・システムには出力に絶縁トランスを使用するものとしなないものがあり、どちらにするかは主にコスト削減の要求によって異なりますが、トランスがない場合は出力電流のDC成分を測定しなければなりません。この電流はDC注入と呼ばれ、その値はシステムの動作に大きく影響します。電力網へのDC注入が多すぎると、経路上のあらゆるトランスを飽和させてしまう恐れがあります。したがって、DC注入は低mAレベルに制限する必要があります。これらのいずれのタスクも、このアプリケーションの回路によって実現でき、コスト削減が可能となります。ホール効果電流トランスデューサのような別の方法では、高電流範囲に1つ、低電流範囲に1つ、合計2個のデバイスが必要になるからです。

AD7401A のオフセット性能

現行測定モジュールにおけるAD7401Aのオフセットは、125°Cまでの温度範囲で測定されています。その結果を示したのが図3で、これらの結果はAD7401Aのデータシートの仕様と一致しています。シャントに電流を流さず

に全温度範囲にわたって測定されたオフセットの最大変動は、 $-40^{\circ}\text{C}\sim+125^{\circ}\text{C}$ で約 $\pm 20\text{ mA}$ です。

テスト時には以下の電圧を印加しています。

- VDD_ISO = 5 V
- VDD_FPGA = 3.3 V
- MCLKIN = 16 MHz (アルテラ FPGA 使用の EVAL-CED1Z、デシメーション・レート 256)
- VIN = 6 V @ 62 mA (電流検出モジュールの入力電源電圧)

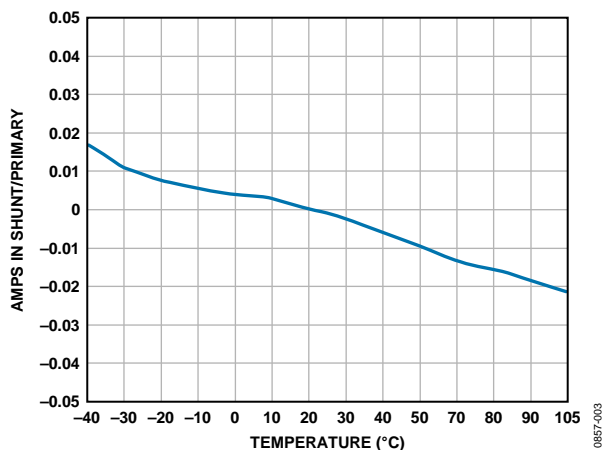


図 3. AD7401A モジュールのオフセット

直線性性能

最大 $\pm 28\text{ A}$ の電流でモジュールの直線性を解析しました。図 4 に示すように、キャリブレーション後は $\pm 0.2\%$ 未満の直線性が実現できます。解析中は、前項で指定した電圧を印加しました。以下のように定義されるフルスケール誤差と絶対誤差の解析を図 4 に示します。

$$\text{フルスケール誤差} = (V_{\text{SHUNT}} - V_{\text{CALC}}) / V_{\text{FULLSCALE}}$$

$$\text{絶対誤差} = (V_{\text{SHUNT}} - V_{\text{CALC}}) / V_{\text{SHUNT}}$$

ここで、

V_{SHUNT} = 高精度シャントの電流 (DVM で測定)

V_{CALC} = ADC の出力からの計算電流値 (AD7401A)

$V_{\text{FULLSCALE}}$ = モジュールのフルスケール電流範囲 (28A)

絶対誤差法を使用する利点は、誤差を強調できる低い測定範囲で誤差を解析できることです。これは、低い電流範囲で DC 注入を測定できるソーラー・アプリケーションでは重要です。

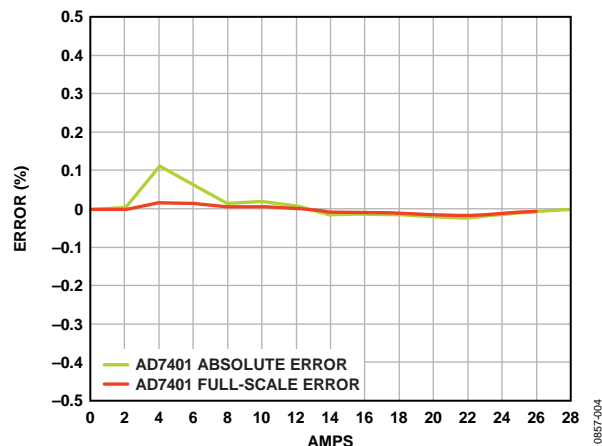


図 4. AD7401A の直線性性能

SINC3 フィルタの性能

AD7401A の仕様は、デシメーション・レート (DR) 256 で指定されています。ただし、このデバイスは、より高いデシメーション・レートでも使用できます。DR=256 での SINC3 フィルタの応答を図 5 に示します。この時の出力データ・レートは 62.5kHz で、FFT ノイズ・フロアは図 6 に示すとおりです。

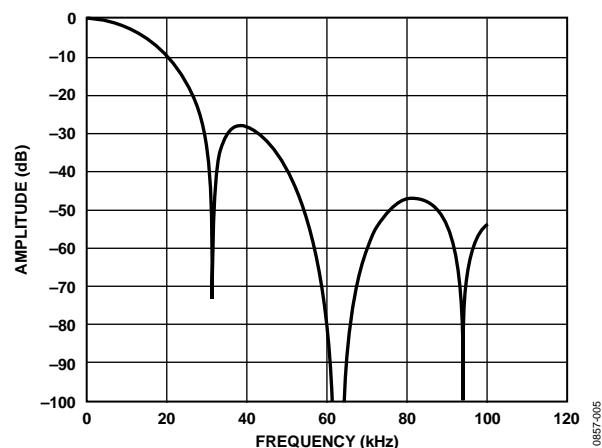


図 5. SINC3 フィルタの応答 (デシメーション・レート=256)
出力データ・レート=62.5kHz

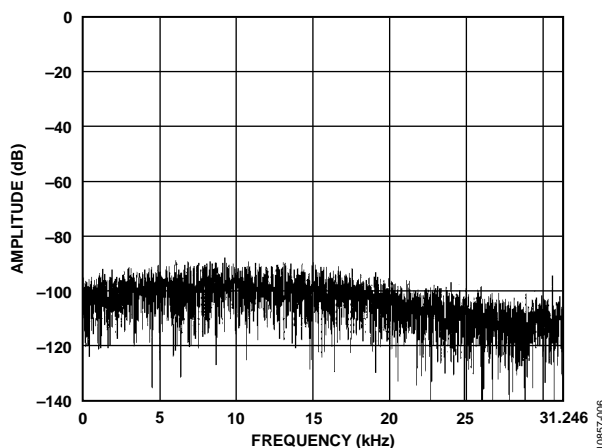


図 6. デシメーション・レート=256、出力データ・レート=62.5kHz 時のノイズ・フロアを示す 16K ポイント FFT

デシメーション・レートを高くすると、SINC3 フィルタの応答が大幅に改善されます。DR=1024 の場合の SINC3 フィルタの応答を図 7 に示します。この場合のデータ・レートは 15.6kHz です。これは、図 8 に示すようにシステムのノイズ性能を改善しますが、データ・レートを低くする必要があります。

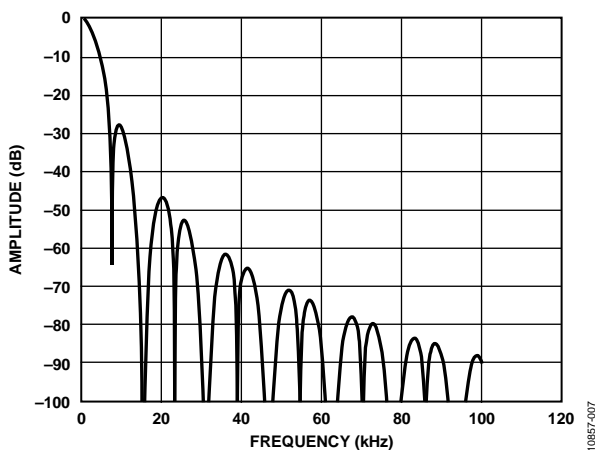


図 7. SINC3 フィルタの応答 (デシメーション・レート=1024) 出力データ・レート= 15.6kHz

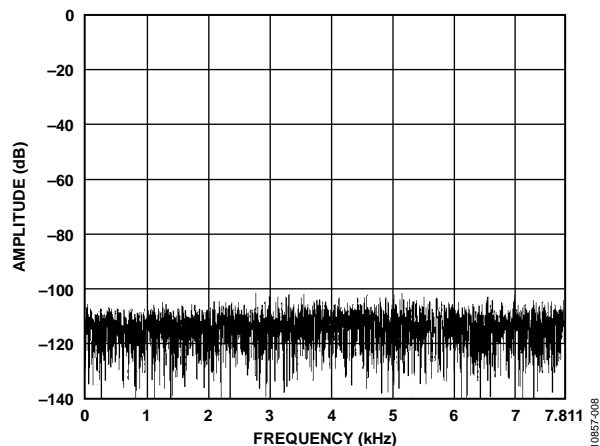


図 8. デシメーション・レート=1024、出力データ・レート= 15.6kHz 時のノイズ・フロアを示す 16K ポイント FFT

レイアウト時の考慮事項

プリント回路ボード (PCB) レイアウトでは、ノイズ放出規格を満たすように特別な注意が必要です。推奨ボード・レイアウトについては、[アプリケーション・ノート AN-0971](#) を参照してください。この種のレイアウト例を図 9 に示します。レイアウトにおいて重要な点は、第 3 層 (フローティング・プレーン) と第 2 層 (グラウンド) 間に適切なオーバーラップを保つことです。この単純なオーバーラップがシステム内でのノイズ放出を最小限に抑えます。図 10 は PCB レイアウトの上面、図 11 は実際のボードの写真です。

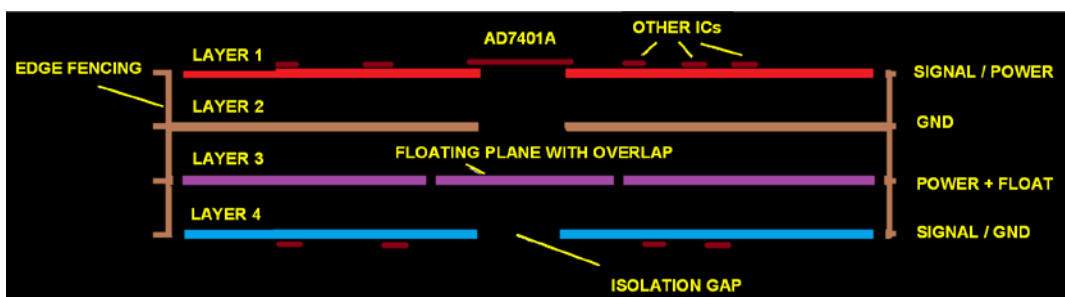


図 9. 4 層ボードの例

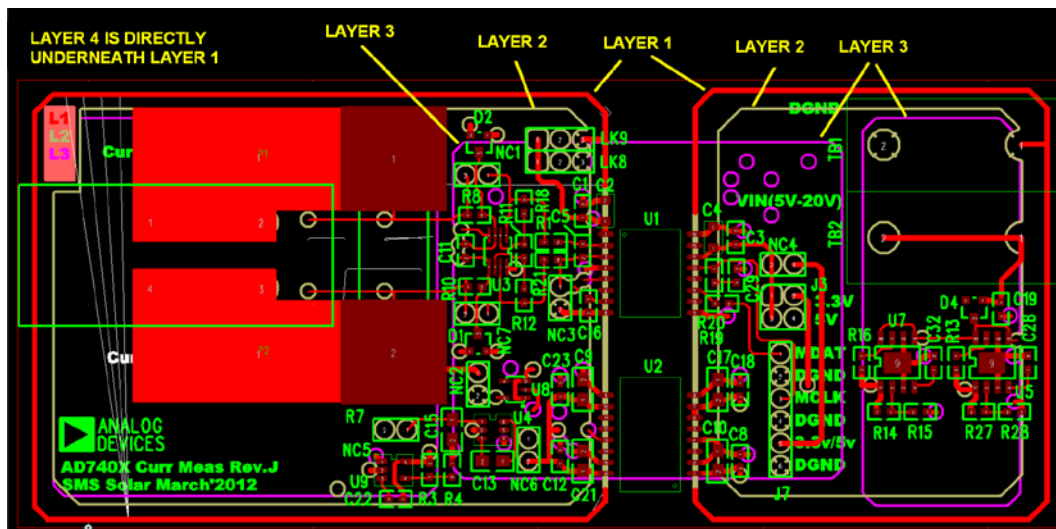


図 10. 電流測定用の推奨レイアウト

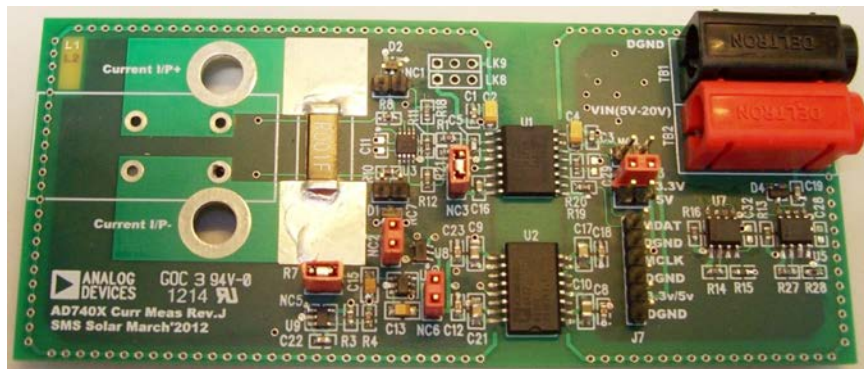


図 11. 電流測定ボードの写真

アナログ・デバイセズの絶縁型 ADC と isoPower デバイスは太陽光産業のニーズを満たし、電力システムに必要な新たな技術的進歩をもたらします。これにより、今日のソーラー・インバータに使用されている従来型の方法から発展した新しい技術を使用した電力網統合化システムにおいて、性能の向上が可能とします。

バリエーション回路

AD8638 オペアンプは、AD8639 のシングル・バージョンです。

AD7401A シグマ・デルタ変調器ファミリーの他の製品には、10MHz クロックを内蔵した AD7400 があります。

回路の評価とテスト

必要な装置

- 100V で 28A を出力できる電源シミュレート用 DC 電源
- 入力電流測定用の 6.5 桁 DVM とキャリブレーション済みシャント
- EVAL-CN0280-EB1Z 評価用ボード
- 6V、200mA の電源
- 7V、2A の電源
- EVAL-CED1Z コンバータ評価および開発ボード用ソフトウェア
- SINC3 フィルタ実装用のコード例は、AD7401A のデータシートに記載されています。

機能ブロック図

図 12 にテスト・セットアップの機能ブロック図を示します。

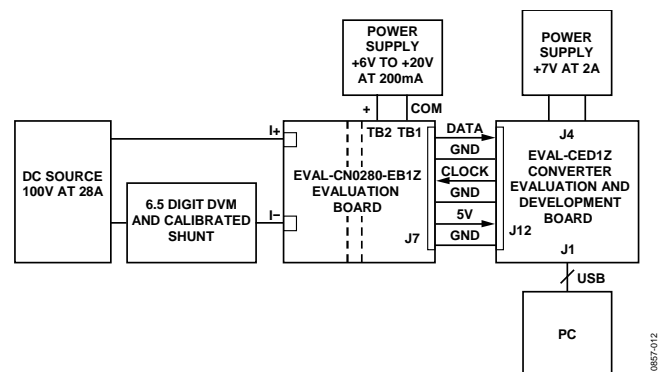


図 12. テスト・セットアップの機能ブロック図

さらに詳しくは

CN-0280 Design Support Package :

<http://www.analog.com/CN0280-DesignSupport>

CN-0185 Circuit Note : 絶縁型 Σ - Δ 変調器、絶縁型 DC/DC コンバータとアクティブ・フィルタを使用した画期的なアナログ to アナログ・アイソレータ

IMS Research : Defining Smart Grids and Smart Opportunities

Application Note AN-0971 : isoPower デバイスでの EMI 放射制御についての推奨事項

Chen, Baoxing. iCoupler® Products with isoPower™ Technology: Signal and Power Transfer Across Isolation Barrier Using Microtransformers

Power Electronics Technology : Microtransformer Isolation Benefits Digital Control

Application Note AN-825 : iCoupler® アイソレーション製品での電源の考慮事項

Analog Dialogue 40 : Digital Isolation Offers Compact, Low-Cost Solutions to Challenging Design Problems.

MT-031 Tutorial : Grounding Data Converters and Solving the Mystery of “AGND” and “DGND”

MT-101 Tutorial : Decoupling Techniques

Analog Dialogue 46-09 : 太陽光発電システムとスマートグリッドの統合化を支えるアイソレーション技術

データシートと評価ボード

[AD7401A データシート](#)

[AD8639 データシート](#)

[ADuM6000 データシート](#)

[ADM8829 データシート](#)

[ADP121 データシート](#)

[ADP7104 データシート](#)

[ADP7182 データシート](#)

改訂履歴

10/13—Revision 0: 初版

「Circuits from the Lab/実用回路集」はアナログ・デバイセズ社製品専用に作られており、アナログ・デバイセズ社またはそのライセンスの供与者の知的所有物です。お客様は製品設計で「Circuits from the Lab/実用回路集」を使用することはできませんが、その回路例を利用もしくは適用したことにより、特許権またはその他の知的所有権のもとでの暗示的許可、またはその他の方法でのライセンスを許諾するものではありません。アナログ・デバイセズ社の提供する情報は正確でかつ信頼できるものであることを期しています。しかし、「Circuits from the Lab/実用回路集」は現状のまま、かつ商品性、非侵害性、特定目的との適合性の暗示的保証を含むがこれに限定されないいかなる種類の明示的、暗示的、法的な保証なしで供給されるものであり、アナログ・デバイセズ社はその利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許権もしくはその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。アナログ・デバイセズ社はいつでも予告なく「Circuits from the Lab/実用回路集」を変更する権利を留保しますが、それを行う義務はありません。商標および登録商標は各社の所有に属します。

©2013 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。

CN10857-0-10/13(0)