

**Circuits
from the Lab™**
Reference Circuits
実用回路集

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。詳しい情報と支援については <http://www.analog.com/jp/CN0196> をご覧ください。

接続／参考にしたデバイス

ADuM7234	絶縁型、高精度のハーフ・ブリッジ 4 A ドライバ
ADG787	2.5 Ω、CMOS、低消費電力のデュアル 2:1 スイッチ
ADuC7061	デュアル 24 ビット ΣΔ ADC 内蔵の ARM7 マイクロコントローラ
ADuM3100	デジタル・アイソレータ
ADP1720	50 mA リニア・レギュレータ
ADCM350	0.6 V リファレンス内蔵のコンパレータ

絶縁型ハーフ・ブリッジ・ドライバを使用する H ブリッジ・ドライバ回路

回路評価用ボード

CN-0196 回路評価用ボード (EVAL-CN0196-EB1Z)

ADuC7061 MiniKit (EVAL-ADuC7061MKZ)

設計と統合ファイル

[回路、レイアウト・ファイル、BOM](#)

回路機能とその利点

図 1 の回路は Hブリッジと呼ばれるもので、低電圧ロジック信号で制御されるハイ・パワー・スイッチング MOSFET で構成されています。この回路は、ロジック信号とハイ・パワー・ブリッジとの間の便利なインターフェースとして機能します。ブリッジには、Hブリッジのハイサイドとローサイドの両方に低価格の N チャンネル・パワー MOSFET を使用します。また、この回路は、コントロール・サイドとパワー・サイド間のガバナック絶縁を実現するインターフェースにもなります。この回路は、モータ制御、電力変換 (コントロール・インターフェースに組み込まれて)、照明、オーディオ・アンプ、無停電電源装置 (UPS) 等に使用できます。

最新のマイクロプロセッサやマイクロコンバータは、一般に消費電力が小さく、低電源電圧で動作します。2.5 V CMOS ロジック出力のソース/シンク電流は μA ~ mA の範囲です。ピーク電流 4 A で 12 V を切り替える Hブリッジを駆動する場合は、インターフェースとレベル変換デバイスを適正に選択して使用する必要があります。低ジッタが必要な場合は特にそうです。

ADG787 は、個別に設定できる 2 個の単極双投 (SPDT) スイッチで構成される低電圧 CMOS デバイスです。DC 電源 5 V で、2 V の最低電圧が有効な高入力ロジック電圧となります。したがって、ADG787 は 2.5 V の制御信号を、ハーフ・ブリッジ・ドライバ ADuM7234 の駆動に必要な 5 V ロジック・レベルに適正に変換することができます。

ADuM7234 は、アナログ・デバイセズ (ADI) の iCoupler® 技術を使って絶縁された独立のハイサイド出力とローサイド出力を提供し、N チャンネル MOSFET のみで Hブリッジ回路を構成できるようにします。N チャンネル MOSFET の使用にはいくつかの利点があります。まず、N チャンネル MOSFET は一般に P チャンネル MOSFET に比べてオン抵抗が 3 分の 1 であり、最大電流は大きくなります。また、切替え速度が速いので、消費電力は小さくなります。さらに、立上り時間と立下り時間は対称となります。

ADuM7234 のピーク駆動電流が 4 A のため、パワー MOSFET のオン/オフの切替えが非常に速く行え、Hブリッジ段での消費電力を最小限に抑えることができます。この回路の Hブリッジの最大駆動電流は 85 A となりますが、これは MOSFET の最大許容電流による制限です。

ADuC7061 は ARM7 をベースにした低消費電力、高精度のアナログ・マイクロコントローラで、パルス幅変調 (PWM) コントローラを内蔵しています。PWM コントローラの出力を設定することにより、適正なレベル変換とコンディショニングを行ったうえで Hブリッジを駆動することができます。

回路説明

2.5 V PWM 制御信号から 5 V へのレベル変換

EVAL-ADuC7061MKZ は 2.5 V ロジック・レベルの PWM 信号を提供しますが、ADuM7234 の最小ハイレベル入力スレッショールドは 5 V 電源で 3.5 V となります。これでは適正な処理ができないため、中間レベル変換器として ADG787 を使用します。ADG787 に入力される最小ハイレベル制御電圧は 2 V であるため、この電圧は ADuC7061 からの 2.5 V レベルに適合します。ADG787 の出力は 0~5 V の範囲で切り替わり、3.5 V のスレッショールドを持つ ADuM7234 の入力を駆動するにはかなり余裕があります。制御 PWM 信号の極性を簡単に設定できるように、2 個のジャンパが用意されています。

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、各社の所有に属します。※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。
©2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. 0

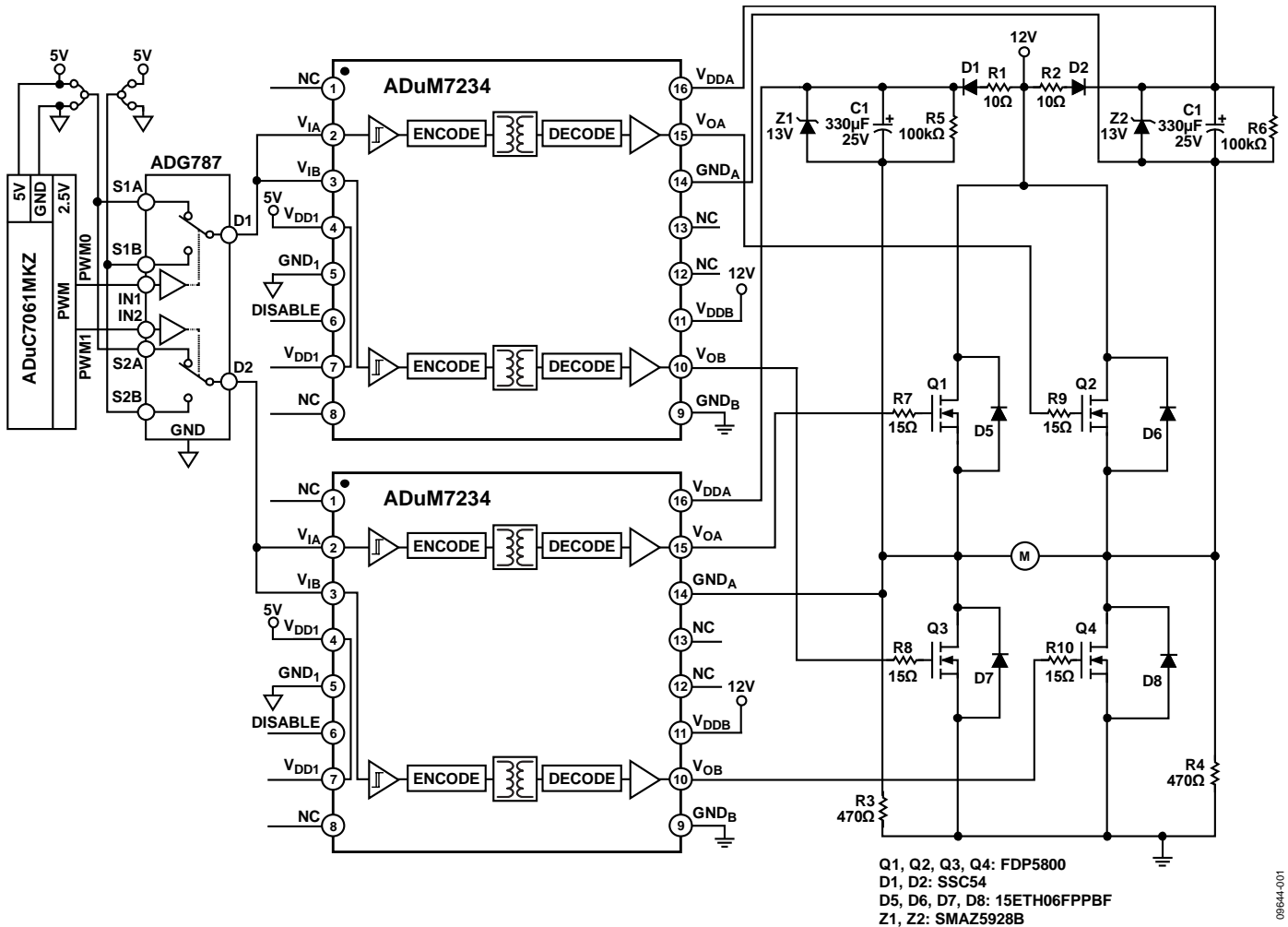


図 1. 絶縁型のハーフ・ブリッジ・ドライバ ADuM7234 を使用する H ブリッジ
 (簡略回路図：すべての接続およびデカップリングが図示されているわけではありません)

H ブリッジについて

図 1 に示す H ブリッジには、4 個のスイッチング素子があります (Q1、Q2、Q3、Q4)。スイッチは、左上側 (Q1) と右下側 (Q4) のペアか左下側 (Q3) と右上側 (Q2) のペアのいずれかがオンになります。ブリッジの同じ側にある 2 つのスイッチが同時にオンになることはありません。スイッチは、MOSFET または IGBT (絶縁ゲート・バイポーラ・トランジスタ) を使って実装し、パルス幅変調 (PWM) 信号など、コントローラからの信号を使ってスイッチをオン/オフして負荷電圧の極性を変更することができます。

ローサイド MOSFET (Q3、Q4) のソースはグラウンドに接続されるので、そのゲート駆動信号もグラウンドを基準とします。一方、MOSFET ペアとしてのハイサイド MOSFET (Q1、Q2) スwitchのソース電圧はオンまたはオフになります。したがって、最適なゲート駆動信号はこのフローティング電圧を基準とし、その電圧に「ブートストラップ」されることとなります。

ADuM7234 からのゲート駆動信号は、各入力と各出力の間に真の絶縁インターフェースが得られるという利点をもたらします。各出力は入力に対して最大±350 V で動作することができるため、負電圧までのローサイド・スイッチングをサポートできます。このため、ADuM7234 は広範囲の正または負のスイッチング電圧で、さまざまな MOSFET 構成のスイッチング特性を確実に制御することができます。テストを安全かつ容易に行うために、この設計の電源には 12 V DC 電源を選択しました。

ブートストラップ・ゲート駆動回路

ハイサイドとローサイドではゲート・ドライバの電源が異なります。ローサイドのゲート駆動電圧は、グラウンドを基準にしているため、グラウンド基準の DC 電源から直接発生します。しかし、ハイサイドはフローティングしているため、ブートストラップ駆動回路が役に立ちます。これは次のように動作します。

ここで、図 1 に示す Hブリッジ回路の左側をご覧ください。ブートストラップ駆動回路は、コンデンサ C1、抵抗 R1 と R3、ダイオード D1 で構成されています。パワーオン後、PWM はすぐには入力されず、MOSFET はすべて、全 DC 電圧がセトリングするまでハイ・インピーダンス状態のままとなります。この間、コンデンサ C1 は R1、D1、C1、R3 経路を介して DC 電源で充電されます。充電されたコンデンサ C1 は、ハイサイド・ゲート駆動用の電圧を供給します。C1 の充電の時定数は $\tau = (R1 + R3)C1$ です。

PWM 信号によって MOSFET がスイッチングすると、ローサイドのスイッチ Q3 がオンになり、ハイサイドのスイッチ Q1 がオフになります。ハイサイドの GNDA はグラウンドにプルダウンされ、コンデンサ C1 が充電されます。Q1 がオンになり、Q3 がオフになると、GNDA は DC 電源電圧にプルアップされます。ダイオード D1 は逆バイアスされ、C1 電圧によって ADuM7234 の VDDA 電圧が約 24 V となります。したがって、コンデンサ C1 は ADuM7234 の VDDA 端子と GNDA 端子間で約 12 V の電圧を維持します。このように、ハイサイド MOSFET Q1 へのゲート駆動電圧は常に Q1 のフローティング・ソース電圧を基準にします。

ハイサイド MOSFET のソース上の電圧スパイク

Q1 と Q4 がオンになると、負荷電流は Q1 から負荷経由で Q4 とグラウンドに流れます。Q1 と Q4 がオフになっても、電流はフリーホイール・ダイオード D6、D7 経由で同じ方向に流れ、Q1 のソースに負のスパイクを発生させます。その結果、ほかのトポロジーを使用しているゲート・ドライバは損傷を受ける可能性があります。負電圧へのローサイド・スイッチングをサポートしている ADuM7234 にはいっさい影響ありません。

ブートストラップ・コンデンサ (C1、C2)

ブートストラップ・コンデンサは、ローサイド・ドライバがオンになるたびに充電され、ハイサイド・スイッチがオンになったときだけ放電されます。したがって、ブートストラップ・コンデンサの値を選択する際に最初に考慮すべきパラメータは、ハイサイド・スイッチがオンになってコンデンサがゲート・ドライバ ADuM7234 のハイサイド用 DC 電源として使用されるときに最大許容電圧降下です。ハイサイド・スイッチがオンになると、ADuM7234 の DC 電源電流は一般に 22 mA になります。ここで、ハイサイドのオン時間を 10 ms (50 Hz、50% デューティサイクル) と仮定します。許容電圧降下 $\Delta V = 1$ V、 $I = 22$ mA、 $\Delta T = 10$ ms の場合は、式 $C = I \times \Delta T / \Delta V$ に基づき、コンデンサは 220 μ F より大きな値にする必要があります。この設計では、330 μ F の値を選択しました。回路がパワーオフになって回路のスイッチング動作時に機能がいっさい提供されなくなると、抵抗 R5 によりブートストラップ・コンデンサは放電します。

ブートストラップ電流制限抵抗 (R1、R2)

直列抵抗 R1 は、ブートストラップ・コンデンサの充電時に電流制限を行います。R1 が大きすぎると、ADuM7234 のハイサイド・ドライバ電源からの無信号時 DC 消費電流によって R1 に過大な電圧降下が発生し、ADuM7234 は低電圧ロックアウトになります。ADuM7234 の最大 DC 電源電流は $I_{MAX} = 30$ mA です。この電流による R1 での降下電圧が $V_{DROP} = 1$ V に制限される場合、R1 は V_{DROP} / I_{MAX} 、すなわち 33 Ω より小さい値にする必要があります。したがって、ブートストラップ抵抗には 10 Ω の抵抗を選択しました。

ブートストラップ・スタートアップ抵抗 (R3、R4)

抵抗 R3 はブートストラップ回路を起動します。パワーオン直後は DC 電圧は確立されず、MOSFET はオフになります。これらの条件下で、C1 は R1、R3、D1、 V_S の経路を介して充電されます。充電電圧は次式で表されます。

$$v_C(t) = (V_S - V_D)(1 - e^{-t/\tau}), \quad (1)$$

ここで、 $v_C(t)$ はコンデンサ電圧、 V_S は電源電圧、 V_D はダイオード電圧降下、 τ は時定数で、 $\tau = (R1 + R3)C1$ です。回路の値は $R1 = 10 \Omega$ 、 $C1 = 330 \mu$ F、 $V_D = 0.5$ V、 $V_S = 12$ V です。前の式から、 $R3 = 470 \Omega$ の場合にコンデンサを最終値の 67% まで充電するには 1 時定数 (158 ms) かかります。抵抗値が大きくなるほど、コンデンサの充電時間は増大します。しかし、ハイサイドの MOSFET Q1 がオンになると抵抗 R1 にかかる電圧は 12 V になるので、抵抗値が小さくなりすぎると消費電力が大幅に増大します。 $R3 = 470 \Omega$ の場合、12 V における抵抗消費電力は 306 mW となります。

ブートストラップ・コンデンサ (Z1、Z2) の過電圧保護

上述したように、誘導負荷がある場合にハイサイド MOSFET がオフになると、電流はフリーホイール・ダイオードに流れます。インダクタンスと寄生容量との共振により、ブートストラップ・コンデンサへの充電エネルギーは ADuM7234 の消費エネルギーより大きくなる場合があります。またコンデンサ上の電圧が過電圧状態になる場合があります。13 V ツェナー・ダイオードはコンデンサの電圧をクランプして、過電圧状態を防止します。

ゲート駆動抵抗 (R7、R8、R9、R10)

ゲート抵抗 (R7、R8、R9、R10) は、必要なスイッチング時間 t_{sw} に基づいて選択します。スイッチング時間とは、 C_{gd} と C_{gs} を充電してスイッチング MOSFET を必要な電荷量 Q_{gd} 、 Q_{gs} まで充電するのに要する時間を指します。

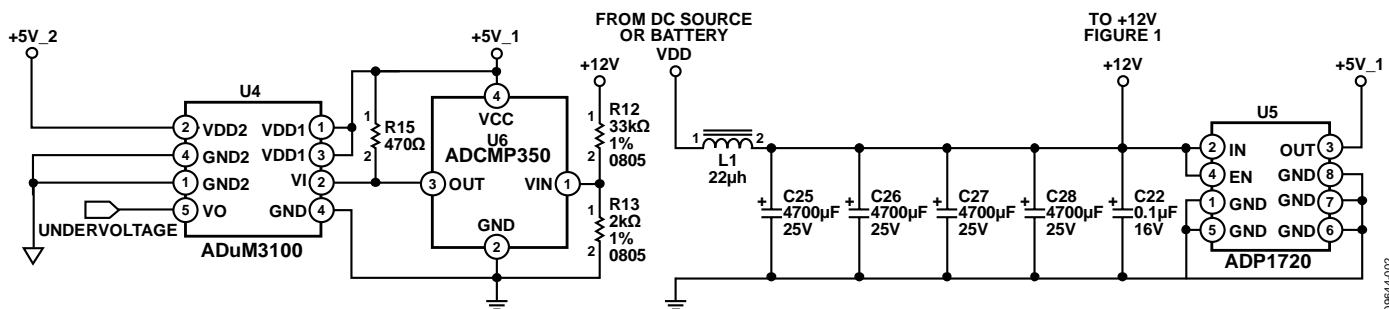


図 2. ADuM7234 の電源レール・フィルタリングと低電圧ロックアウト保護

ゲート駆動電流 I_g は次式で表すことができます。

$$I_g = \frac{Q_{gd} + Q_{gs}}{t_{sw}} = \frac{V_{DD} - V_{gs(th)}}{R_g + R_{DRV}} \quad (2)$$

ここで、 V_{DD} は電源電圧、 R_{DRV} はゲート・ドライバ ADuM7234 の等価抵抗、 $V_{gs(th)}$ はスレッシュホールド電圧、 R_g は外部ゲート駆動抵抗、 Q_{gd} と Q_{gs} は必要な MOSFET 電荷、 t_{sw} は必要なスイッチング時間です。

ADuM7234 ゲート・ドライバの等価抵抗は次式で計算することができます。

$$R_{DRV} = \frac{V_{DDA}}{I_{OA(SC)}} \quad (3)$$

ADuM7234 のデータシートに従い、 $V_{DDA} = 15 \text{ V}$ 、出力短絡回路パルス電流 $I_{OA(SC)} = 4 \text{ A}$ とします。この場合、式 3 から R_{DRV} は約 4Ω となります。

FDP5800 MOSFET のデータシートから、 $Q_{gd} = 18 \text{ nC}$ 、 $Q_{gs} = 23 \text{ nC}$ 、 $V_{gs(th)} = 1 \text{ V}$ です。

必要なスイッチング時間 t_{sw} が 100 ns のとき、式 2 を R_g について解くと、 R_g は約 22Ω となります。実際の設計では、ある程度余裕を持たせて 15Ω 抵抗を選択しました。

電源レール・フィルタリングと低電圧保護

ピーク負荷電流が大きいため、DC ソース電圧 (V_{DD}) を適正にフィルタリングして、ADuM7234 が低電圧ロックアウトになるのを防ぐと同時に電源が損傷を受けないようにする必要があります。選択したフィルタは、 $22 \mu\text{H}$ パワー・インダクタに直列な 4 個の $4700 \mu\text{F}$ 、 25 V 並列コンデンサで構成されています (図 2 を参照)。 100 kHz でコンデンサの規定の最大 RMS リップル電流は 3.68 A です。これらのコンデンサの 4 個は並列なので、最大許容 RMS リップルは 14.72 A です。したがって、 $I_{PEAK} = 2\sqrt{2} \times I_{RMS} = 41.63 \text{ A}$ です。フィルタされた $+12 \text{ V}$ も、図 1 に示す回路を駆動します。ADuM7234 の低電圧ロックアウトを防ぐには、図 2

の回路を使って電源電圧が 10 V 未満のときに ADuM7234 への入力をディスエーブルにします。回路は、ADuM7234 の DISABLE ピンにロジック・ハイを印加することでディスエーブルにできます。

オープン・ドレインのアクティブ・ロー出力付きコンパレータ ADCMP350 を使用して、DC 電源電圧を監視します。抵抗分圧器 (R_{12} 、 R_{13}) の比は、電源電圧が 10.5 V のときに分圧器出力が 0.6 V となるよう選択します。これはコンパレータの 0.6 V オンチップ・リファレンスと同じ大きさです。電源電圧が 10.5 V を下回ると、コンパレータの出力はハイになります。ADuM7234 の入力側と出力側はガルバニック絶縁されているため、出力側からの DISABLE 信号をアイソレータ経由で入力側に転送する必要があります。ADuM3100 は iCoupler 技術に基づくデジタル・アイソレータです。ADuM3100 は、 3.3 V 動作と 5 V 動作に対応します。 12 V のフィルタ処理済み電源が ADP1720 リニア・レギュレータを駆動し、ADuM3100 の右側の絶縁側に 5 V ($+5V_{1}$) を供給します (図 2 を参照)。

負荷と PWM 信号

インダクタを負荷として使用した場合、一定の電圧が印加されるとインダクタを流れる電流は直線的に変化します。電圧 U が 12 V のとき、オン抵抗に起因する MOSFET 上の電圧降下を無視すると次式が成り立ちます。

$$U = L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

50 kHz 、 8% デューティサイクルの PWM 信号で $4 \mu\text{H}$ Coilcraft 製パワー・インダクタ (SER2014-402) を負荷とする場合、負荷電流の波形は図 3 のようになります。インダクタ電流は、電流プローブで測定しています。

12 V の電源電圧と $4 \mu\text{H}$ インダクタの場合、式 4 から $3 \text{ A}/\mu\text{s}$ の傾きが予想されますが、実際の測定値は $2.8 \text{ A}/\mu\text{s}$ でした。測定値が小さくなったのは、MOSFET の抵抗で電圧が降下したためです。

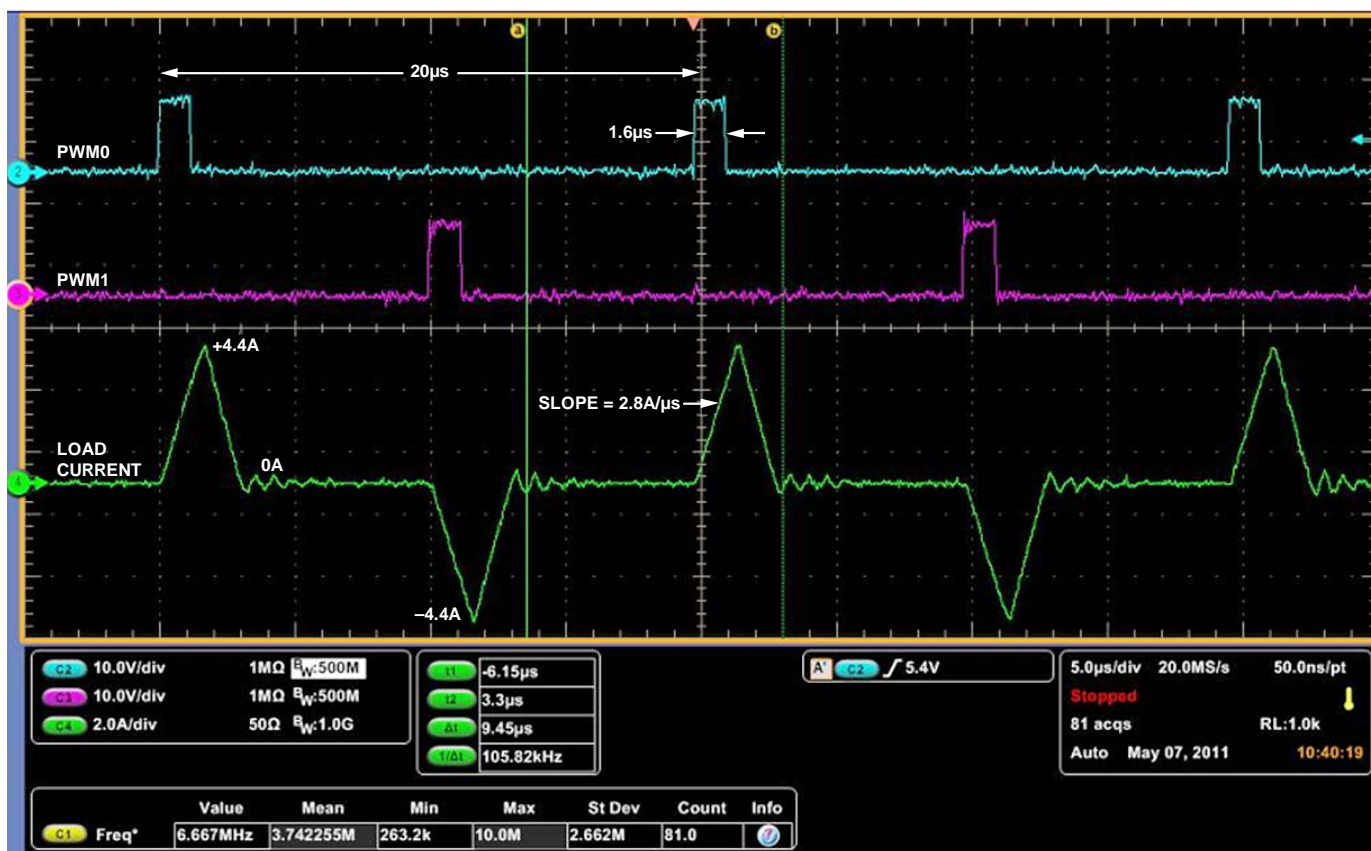


図3. 4 µH 負荷で PWM パルスの関数としての負荷電流

電流オフの直後には、波形に少量のリングングが生じます。この現象は、MOSFET およびフリーホイール・ダイオードの誘導負荷と寄生容量との共振によるものです。

回路内ではインダクタの最大定格電流を超えないことが重要です。そういったことが起きるとインダクタは飽和状態になり、電流が急激に増大して、回路と電源に損傷を与える可能性があります。この回路で負荷として使用される Coilcraft 製の SER2014-402 インダクタは、定格飽和電流が 25 A です。

バリエーション回路

この回路は、デバイスをいくつか追加すれば 3 相制御アプリケーションに簡単に拡張できます。また、この回路は高い電源電圧を必要とするアプリケーションにも使用できますが、MOSFET とフィルタ・コンデンサの定格を超えないよう注意する必要があります。

必要な装置

- PC : USB ポート、Windows XP/Windows Vista (32 ビット) /Windows 7 (32 ビット) を搭載
- EVAL-CN0196-EB1Z 回路評価用ボード
- EVAL-ADuC7061MKZ 評価用ボード

- DC 電源またはバッテリー : +12 V、10 A
- Coilcraft SER2014-402 パワー・インダクタなどの負荷
- 電流プローブ付きのオシロスコープ

測定の準備

CN0196 評価用ソフトウェア・ディスクを PC の CD ドライブに挿入して、評価用ソフトウェアをロードします。評価ソフトウェア・ディスクのあるドライブを探し、Readme ファイルを開きます。Readme ファイルの指示に従って、評価ソフトウェアをインストールし、使用してください。

セットアップとテスト

EVAL-ADuC7061MKZ にファームウェア・コードをダウンロードして、CN-0196 評価用ソフトウェアをインストールします。Readme ファイルのジャンプ設定に従って、EVAL-ADuC7061MKZ と EVAL-CN0196-EB1Z からの制御信号を接続してください。

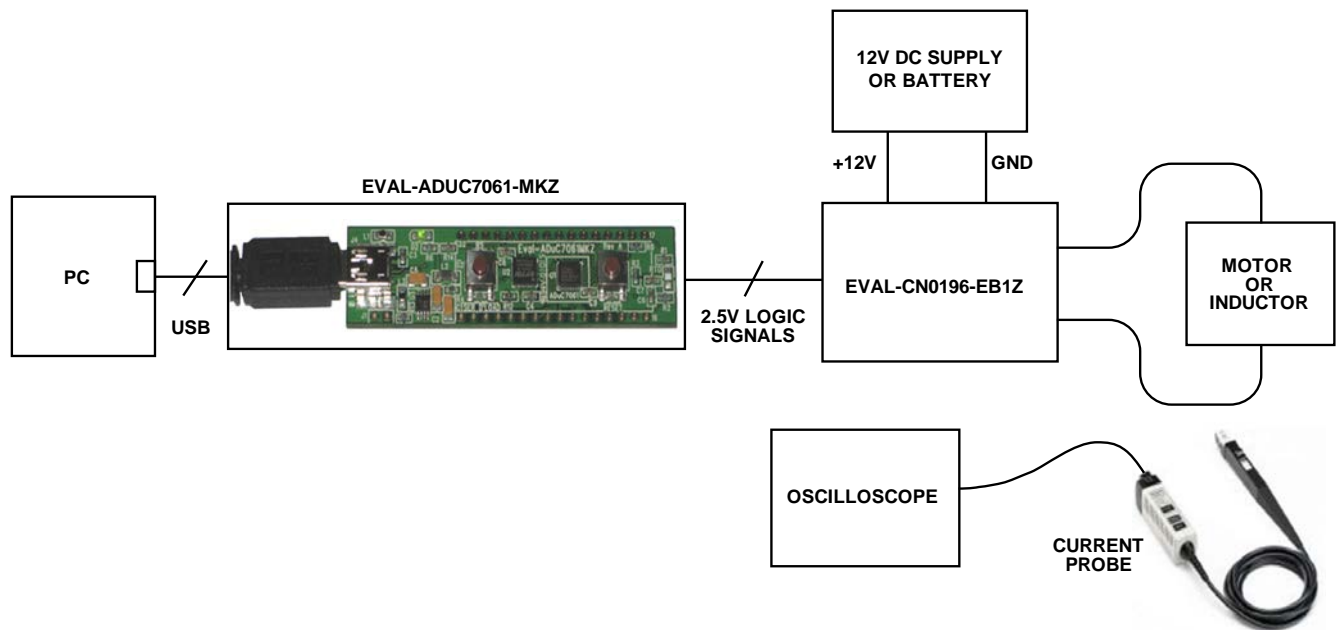


図 4. テスト・セットアップの機能ブロック図

ジャンパ LK1 を接続し、+12 V 電源を CN2 に印加し、ソフトウェアを起動して、USB ケーブルで PC と EVAL-ADuC7061-MKZ ボード上の USB ミニコネクタを接続します。インダクタを負荷として使用し、ソフトウェアを実行して、電流プローブでインダクタの電流を測定します。

評価用ソフトウェアを使用して適正な PWM 信号を得る方法については、CN0196 評価用ソフトウェアの Readme ファイルをご覧ください。

さらに詳しくは

CN-0196 Design Support Package:
www.analog.com/CN0196-DesignSupport

Analog Dialogue 39 :
[高速プリント回路基板 レイアウトの実務ガイド](#)

MT-101 Tutorial : [Decoupling Techniques](#)

データシートと評価用ボード

CN-0196 回路評価用ボード ([EVAL-CN0196-EB1Z](#))

[ADuM7234 データシート](#)

[ADuC7061 データシート/評価用ボード](#)

[ADG787 データシート](#)

[ADuM3100 データシート](#)

[ADP1720 データシート](#)

[ADCMP350 データシート](#)

改訂履歴

9/11—Revision 0: 初版

「Circuits from the Lab/実用回路集」はアナログ・デバイセス社製品専用で作られており、アナログ・デバイセス社またはそのライセンスの供与者の知的所有物です。お客さまは製品設計で「Circuits from the Lab/実用回路集」を使用することはできますが、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・デバイセス社の提供する情報は正確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・デバイセス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・デバイセス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。