

Application Note

絶縁型アンプ用ブートストラップチャージポンプ電源の設計



Maggie Lee

概要

絶縁型アンプは、入力信号と出力信号の間を絶縁します。モータードライブの位相電流センシングなど、多くのアプリケーションに役立ちます。絶縁型アンプへのハイサイド電源の供給は、時には困難な場合があります。このアプリケーションノートでは、ハイサイド電源を生成するための小型で低コストの代替手段としてブートストラップチャージポンプ回路を紹介し、このような回路の設計の詳細について説明します。

目次

1 はじめに.....	2
2 ブートストラップ電源の設計.....	2
2.1 チャージポンプコンデンサの選択.....	4
2.2 TINA-TIでのシミュレーション.....	5
2.3 AMC1311-Q1によるハードウェアテスト.....	8
3 まとめ.....	8
4 リファレンス.....	8

図の一覧

図 1-1. ブートストラップ電源.....	2
図 2-1. ブートストラップコンデンサの充電.....	3
図 2-2. ブートストラップコンデンサの放電.....	3
図 2-3. シミュレーションモデル.....	5
図 2-4. コンデンサ値の比較.....	5
図 2-5. PWM周波数の変更.....	6
図 2-6. PWMデューティサイクルの変更.....	7

表の一覧

表 2-1. 各種コンデンサを使用した定常状態出力電圧.....	5
表 2-2. 各種周波数のスタートアップ時間と定常状態電圧.....	6
表 2-3. 各種デューティサイクルのスタートアップ時間と定常状態電圧.....	7

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

絶縁型アンプは、ローサイドからの測定値を維持しながら、比較的高い精度で電圧または電流を測定できます。これは、安全性に関連する懸念のためにハイサイド電圧で絶縁が必要なアプリケーションや、ハイサイドで突然の過渡が発生し、ローサイドのコントローラが損傷する可能性があるアプリケーションで有用です。一般的なアプリケーションとして、高電圧モータバスの測定やモータ位相電流の測定があります。

ただし、絶縁型アンプは、ハイサイド電源をローサイド電源から絶縁する必要があるため、サイズと複雑さが増大する可能性があります。別の方法の 1 つはトランス絶縁型電源で、ハイサイドをローサイドから絶縁した状態に維持しながら、ローサイドからハイサイドレールを生成します。ただしトランスは大型でコストがかかる可能性があります。ブートストラップチャージポンプ電源は、コスト効率の優れた代替手段です。電力はパルス幅変調 (PWM) 信号から供給され、必要なのはコンデンサ、ダイオード、電流制限抵抗だけです。場合によっては、リニアドロップアウトレギュレータ (LDO) が必要になることもあります。

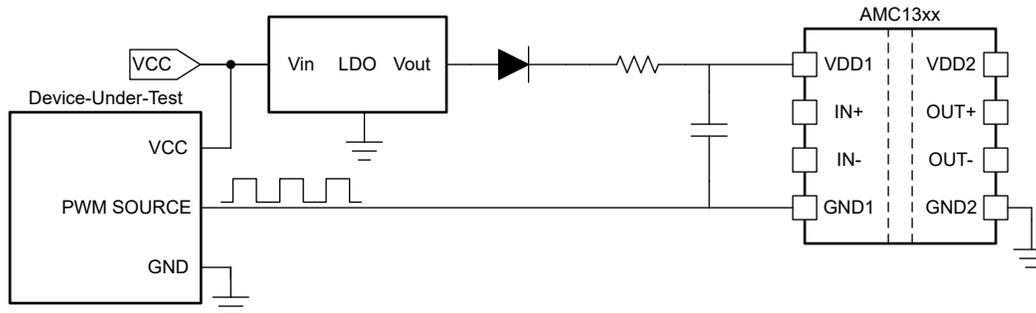


図 1-1. ブートストラップ電源

2 ブートストラップ電源の設計

ブートストラップは、入力電圧と PWM 信号で動作します。入力電圧はテスト対象デバイス (DUT) に電力を供給しているのと同じ電源から供給され、入力電圧は LDO を使用して降圧できます。ブートストラップは動作に PWM 信号を必要とするため、この信号は PWM 信号を生成する DUT または PWM 信号と組み合わせて動作する DUT とのみ使用できます。DUT は、図 1-1 に示すように、必ずしもアンプのローサイドから絶縁されているわけではありません。このため、DC/DC パワーコンバータのみを使用することはできません。アンプのハイサイドは、DUT とグランド接続を共有していません。PWM 信号は、絶縁アンプのハイサイドグランドに接続されます。ブートストラップは、ハイサイド電源が常に PWM 信号よりも上にフローティングになるようにします。これにより、ハイサイドグランドが PWM 信号であっても、ハイサイド電源が安定した信号になります。

ブートストラップ回路への入力電圧によって出力の定常状態の値が決定されるため、アンプのハイサイド電源仕様への違反を避けるため、入力電圧は目的のハイサイド電源電圧に近い値にする必要があります。DUT VCC バスが絶縁型アンプの推奨動作条件の範囲外である場合は、LDO が必要です。LDO は一般に、追加の外付け部品がほとんど必要なく、LDO はスイッチングレギュレータよりもクリーンな信号を生成するため、このアプリケーションでは LDO が推奨されます。ブートストラップ回路への入力電圧は DUT グランドよりも高いため、図 2-1 に示すように PWM 信号が Low のとき、ダイオードの両端で正の電圧降下が生じ、導通してコンデンサが充電されます。

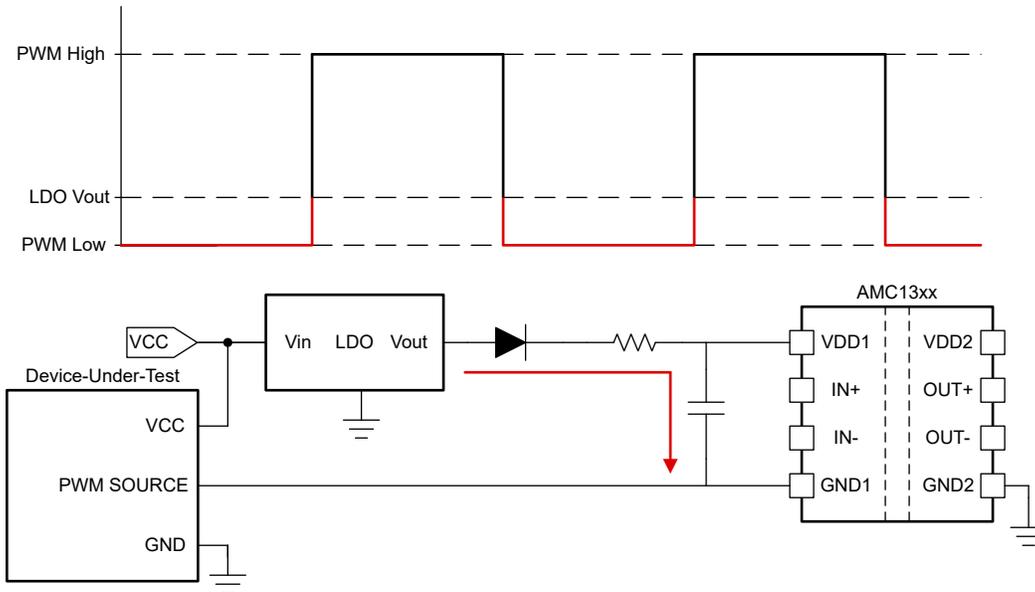


図 2-1. ブートストラップ コンデンサの充電

PWM 信号が High のとき、コンデンサの両端で電圧降下も負の電圧降下もなく、信号の導通が停止したため、コンデンサは図 2-2 に示すようにハイサイド電源に放電されます。PWM 信号が Low のときにコンデンサに蓄積される電圧の大きさと、PWM 信号が High のときにコンデンサによって放電される電圧の大きさが等しい場合、ブートストラップ回路は定常状態を実現できます。これは、スタートアップ時間と定常状態のリプルが RC 時定数に依存し、PWM 信号の周波数とデューティサイクルの影響を受ける可能性があることを意味します。

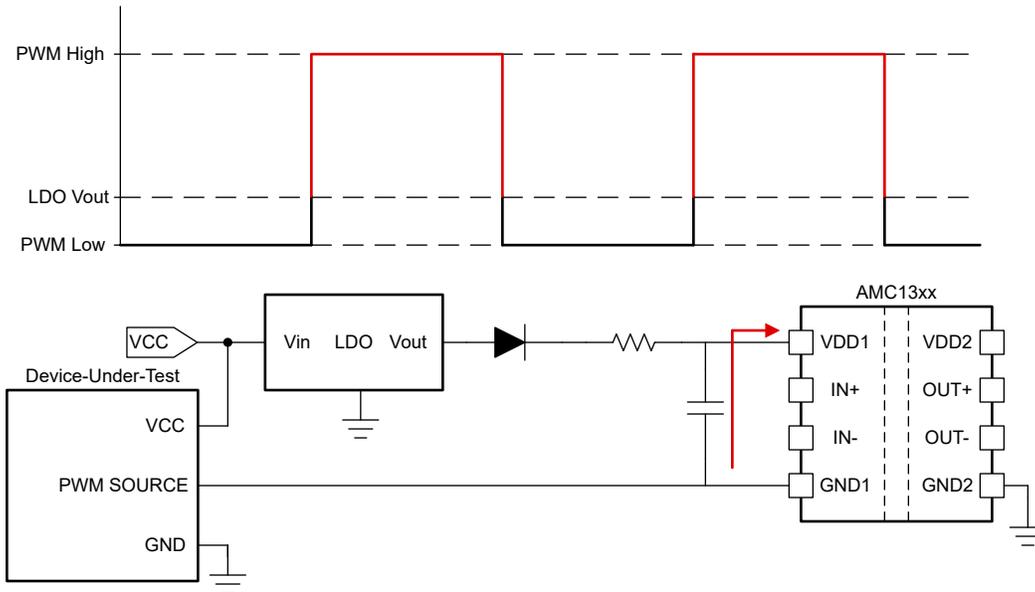


図 2-2. ブートストラップ コンデンサの放電

2.1 チャージ ポンプ コンデンサの選択

ブートストラップから供給される最大値は、入力電源をブートストラップに取り込み、ダイオードの電圧降下を減算することで概算できます。ただし、RC 回路と PWM 信号の値によっては、ブートストラップが最大値に達する前に、ブートストラップが定常状態に達することがあります。RC 時定数は次のように定義されます。

$$\tau = R \times C \quad (1)$$

コンデンサと抵抗によって、コンデンサの充電および放電に関する RC 時定数が決定されます。スタートアップ時間と定常状態のリップルの間には、トレードオフがあります。時定数が小さいほど、コンデンサの充電と放電をより迅速に実行でき、より早く定常状態に到達できます。ただし、コンデンサが定常状態に達すると、時定数が大きい場合よりも、PWM デューティ サイクルごとに、コンデンサが充電または放電する電圧が大きくなり、リップルが大きくなる可能性があります。同様に、時定数が大きいほど、充電または放電の時間が長くなるため、リップルが減少します。コンデンサの値は、次のパラメータを使用して推定できます。

1. PWM スイッチング周波数
2. PWM デューティ サイクル
3. 絶縁型アンプに電力を供給するために必要な電流
4. 許容リップル

式 3 に示すように 式 2 を並べ替えることで、容量を求めることができます。

$$Q = I \times t = \Delta V_{\text{ripple}} \times C \quad (2)$$

$$C = \frac{I \times t}{\Delta V_{\text{ripple}}} \quad (3)$$

スイッチング周波数 20kHz、デューティ サイクル 50%、AMC1311-Q1 データシートからの最大電流を使用し、100mV の最大リップル要件が要求されると仮定すると、次の最小容量値が求められます。

$$C = \frac{9.7\text{mA} \times 0.5 \times \frac{1}{20\text{kHz}}}{100\text{mV}} = 2.4\mu\text{F} \quad (4)$$

そこから、ブートストラップのシミュレーションを実行してスタートアップ時間を推定し、スタートアップ時間の要件に基づいて適切なコンデンサと抵抗を選択できます。抵抗がアンプのハイサイドに十分な電流が流れることを妨げないように、抵抗を選択する必要があります。

2.2 TINA-TI でのシミュレーション

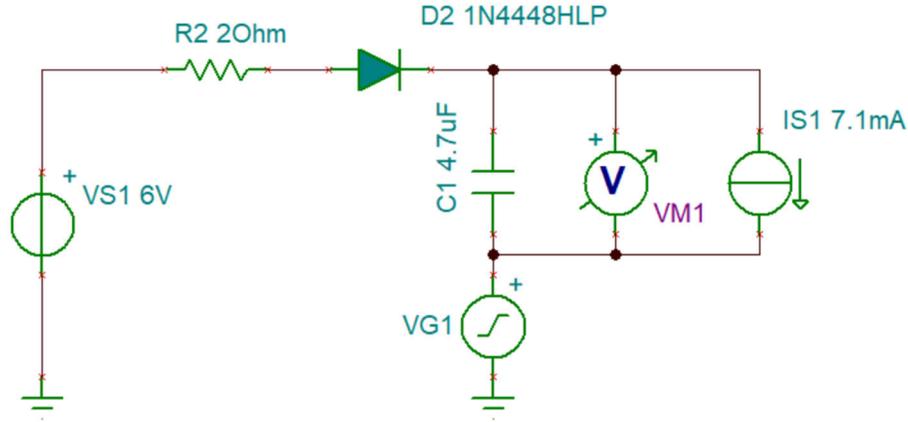


図 2-3. シミュレーション モデル

VS1 は LDO からの出力であり、VG1 は PWM 信号のシミュレーションに使用し、IS1 は絶縁型アンプから引き出す負荷をシミュレーションします。VS1 は 6V、ダイオードの両端での電圧降下は 300mV なので、ブートストラップの最大出力は 5.4V です。VG1 は 20kHz、50V_{pp} の PWM 信号を調達し、デューティサイクルは 50% です。C1 では、4 種類のコンデンサ値がステップ実行されます。

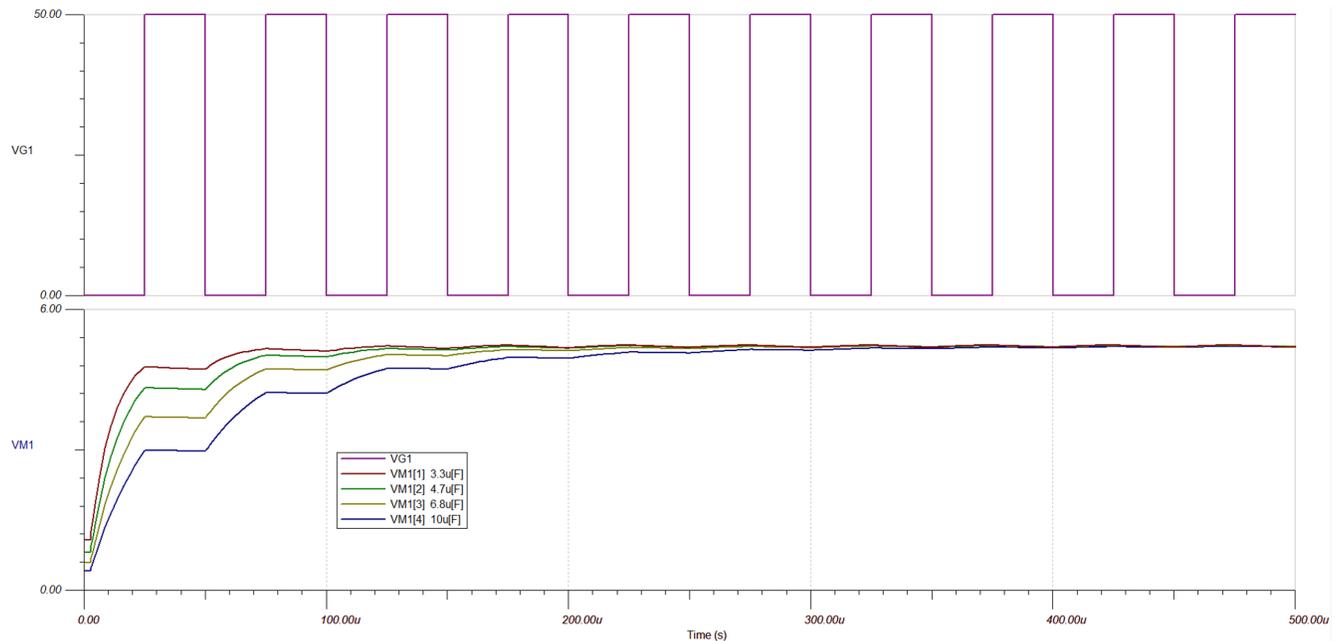


図 2-4. コンデンサ値の比較

表 2-1. 各種コンデンサを使用した定常状態出力電圧

コンデンサの値 (μF)	定常状態リップル (mV)	平均定常状態値 (V)
3.3	53.6	5.215
4.7	37.7	5.200
6.8	25.8	5.215
10	17.7	5.215

図 2-4 に、同じ PWM 信号での 4 種類のコンデンサ値を示します。表 2-1 に、各種コンデンサを使用した定常状態出力電圧を示します。どのコンデンサも理論上の最大定常状態値である 5.4V に達しないことに注意してください。ただし、リップルが減少すると、スタートアップ時間は明らかに増加します。4.7 μ F を持つ信号は、スタートアップ時間とリップルの間でバランスがとれています。

ブートストラップ回路のスタートアップ時間と定常状態のリップルは、入力 PWM 信号の周波数とデューティサイクルにも依存します。シミュレーションでは、C1 を単一の値に設定し、VG1 によって生成される PWM 信号を変更することで、このことを確認できます。

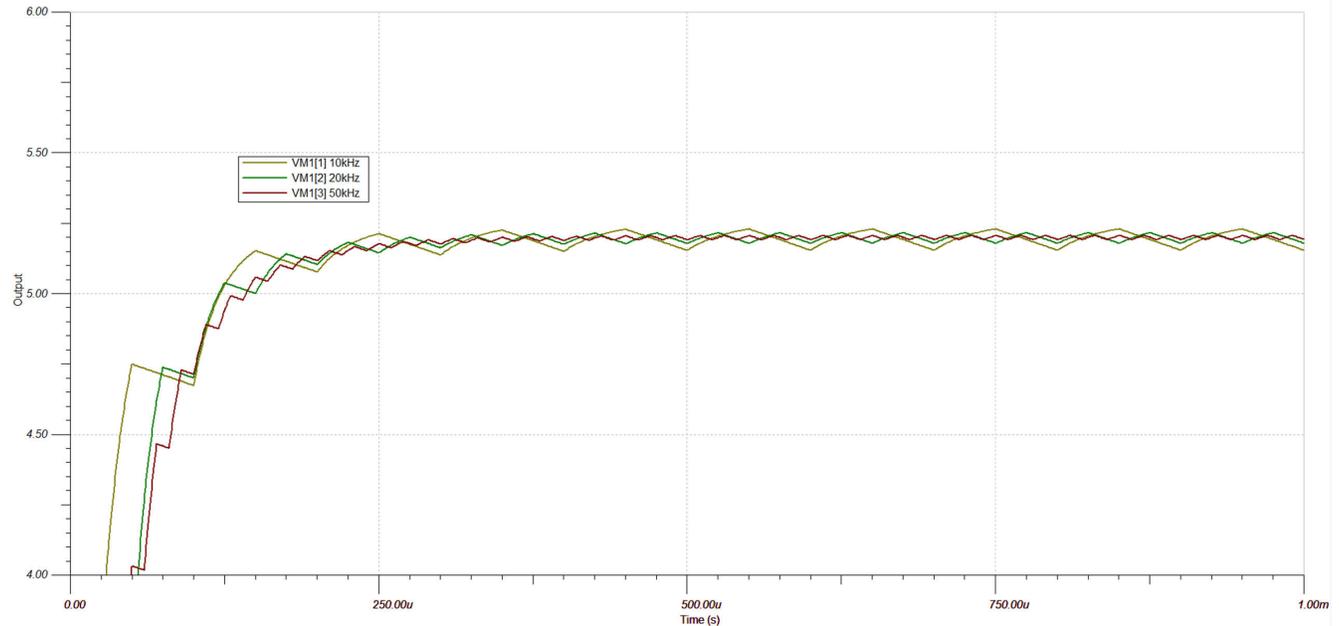


図 2-5. PWM 周波数の変更

表 2-2. 各種周波数のスタートアップ時間と定常状態電圧

PWM 周波数 (kHz)	定常状態リップル (mV)	平均定常状態値 (V)
10	75.1	5.190
20	37.7	5.200
50	14.7	5.200

C1 は 4.7 μ F で、PWM 信号の振幅は 50V_{pp}、デューティサイクルは 50% です。表 2-2 に示すように、この周波数は、スタートアップ時間や平均定常状態にそれほど大きな影響を及ぼさずに、出力リップルにかなり大きな影響を及ぼします。

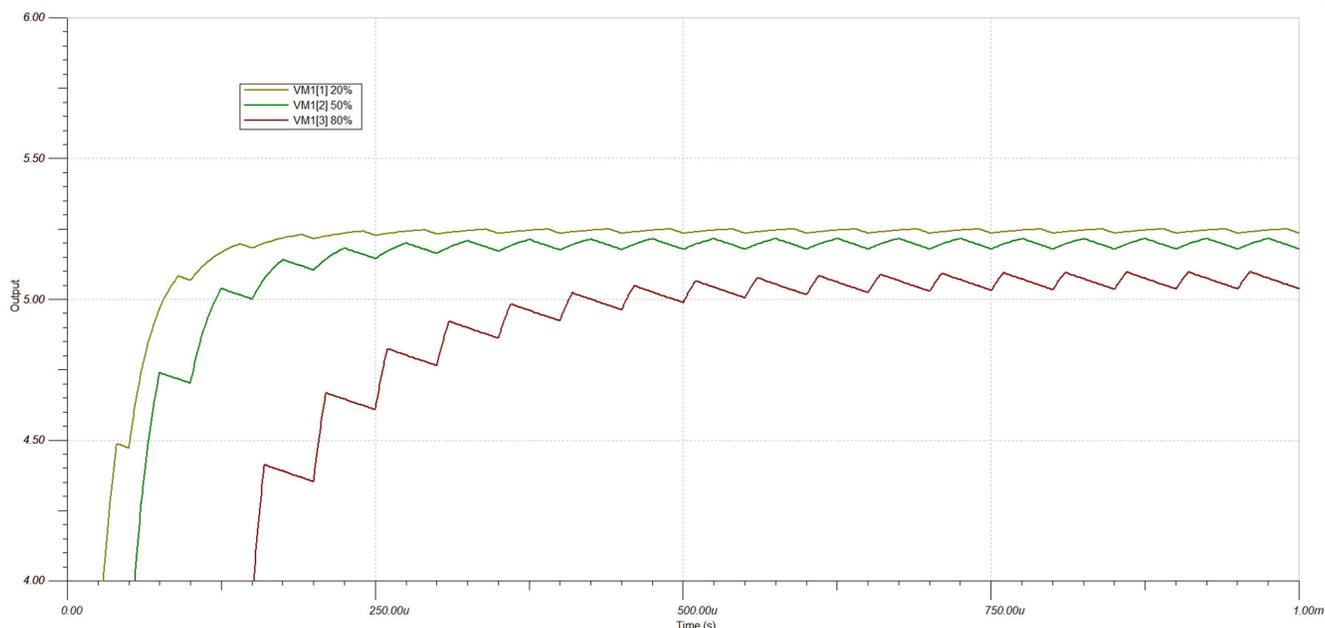


図 2-6. PWM デューティ サイクルの変更

表 2-3. 各種デューティ サイクルのスタートアップ時間と定常状態電圧

PWM のデューティ サイクル	定常状態リップル (mV)	平均定常状態値 (V)
20%	14.7	5.245
50%	37.7	5.200
80%	59.9	5.070

C1 は $4.7\mu\text{F}$ で、PWM 信号の振幅は $50V_{\text{pp}}$ 、周波数は 20kHz です。図 2-6 および 表 2-3 に示すように、スタートアップ時間と平均出力はさらに大きな影響を受けます。

リップルが大きすぎると、電源のバウンスが出力に同相誤差を引き起こす可能性があるため、絶縁型アンプの性能に影響を及ぼす可能性があります。ただし、アンプがアンプのハイサイド電源の最小推奨値に達するまで、絶縁アンプが DUT を正確に測定することは検証できません。予測される PWM 出力信号を把握していることは、システムのパラメータ内で効果的なブートストラップ回路を設計する上で非常に重要です。ただし、 $4.7\mu\text{F}$ コンデンサは、PWM 信号のデューティ サイクル 50%、周波数 20kHz を想定して選択されているため (セクション 2.1 を参照)、PWM 信号の特性に基づいて最小容量を調整できます (式 4 を参照)。

2.3 AMC1311-Q1 によるハードウェア テスト

シミュレーションを検証するために、実際の回路を [図 1-1](#) として構築します。C = 4.7 μ F、R = 2 Ω 、LDO の出力は 6V、入力 PWM 信号は 20kHz において 50V_{pp} で、デューティサイクルは 50% です。AMC1311-Q1 は選択された絶縁型アンプ、TPS7A4101 は広い入力範囲に対応する選択された LDO です。

スタートアップ時間は 260 μ s 付近で、定常状態の出力は 5.1V でリップルは 29.7mV であり、[図 2-3](#) とかなり一致しています。シミュレーションとハードウェアの不一致は、シミュレーションの設計には考慮されていない機器の電流制限が原因で発生します。

クリーンな電源を使用する場合と比較して、ブートストラップ電源からのリップルが AMC1311-Q1 の性能に及ぼす影響は最小限でした。このクリーンな信号は、1 個のトランスと 1 個の LDO を使用して、ローサイド電源レールから生成されたものです。このトランスの電源サイズは、ブートストラップ電源の約 2 倍であり、トランスのコストが原因で、ブートストラップに比べてかなり高価です。リップルが大きすぎた場合は、シンプルな RC フィルタを使用してブートストラップ電源を平滑化することもできます。この場合、回路のサイズとコストを最小限に抑えることができます。

3 まとめ

チャージポンプブートストラップ回路は、PWM アプリケーションで絶縁型アンプ用の絶縁型電源レールを生成する効果的な方法です。適切に設計されたブートストラップ電源は、スペースとコストを節約しながら、クリーンな電源と同様に効果的に動作できます。

ブートストラップ回路を設計する際には、いくつかの重要な要因を考慮する必要があります。絶縁型アンプの引き込み電流、PWM 信号の周波数とデューティサイクル、回路のスタートアップ時間の許容範囲、絶縁型アンプの許容電源リップルを把握しておくことが重要です。これらの仕様はすべて、ブートストラップ回路で使用する RC 回路の選択に影響を及ぼす可能性があります。ブートストラップのシミュレーションが簡単で、設計者はさまざまな回路条件でさまざまな RC 値を簡単にテストできるため、選定プロセスが非常に簡単になります。

4 リファレンス

1. テキサス・インスツルメンツ、『[AMC13xx のパラメータ テーブル](#)』。
2. テキサス・インスツルメンツ、『[ブートストラップチャージポンプ手法を使用する DC + バス電源ソリューション](#)』アプリケーションノート。
3. テキサス・インスツルメンツ、『[Using Isolated Comparators for Fault Detection in Electric Motor Drives](#)』アナログ設計ジャーナル。
4. テキサス・インスツルメンツ、『[絶縁型電流センシングの設計上の考慮事項](#)』アナログ設計ジャーナル。

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、

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](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 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。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。

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、TI 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 © 2024, Texas Instruments Incorporated