

*Application Note*宇宙グレードのマルチチャネル降圧コンバータにより、**V_{REF}**を下回る高精度出力を実現

Andrew Fondaw

概要

一般的な降圧コンバータアプリケーションでは、コンバータのリファレンス電圧 (V_{REF}) と同じ低い出力電圧のレギュレーションが可能です。時々、回路がコンバータのリファレンス電圧より低い高精度の電源を必要とすることがあります。修正された帰還回路と外部電圧リファレンスと組み合わせて使用することで、コンバータをリファレンス電圧より低い値に制御できます。ただし、この設計は、外部電圧の誤差が増えて、電源の精度を低下させます。複数のチャネルに単一の電圧リファレンスを使用すると、リファレンス電圧を下回るレギュレーションを行いながら、高いレベルの精度を維持できます。このアプリケーションノートでは、この方法の概念と分析について紹介し、TPS7H4104EVM を使用した結果を回路例に示します。

目次

1はじめに.....	2
2動作の概念.....	2
3出力精度の維持.....	4
4シミュレーション結果.....	5
4.1 V_{EXT} 出力偏差の影響.....	7
5TPS7H4104EVM を使用したテスト結果.....	8
6まとめ.....	11
7参考資料.....	11

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

最新の宇宙船で使用される **FPGA** や **ASIC** などのエレクトロニクスは、通常、電流のポイントオブロード降圧コンバータのリファレンス電圧（通常、0.6V ~ 1.2V）またはそれを上回る電圧を必要とします。さらなる進歩に伴い、これらのシステムの一つで、電力またはバイアスを供給するために、高精度の低電圧レールが必要になることがあります。これまでの方法で、リファレンス電圧より低い電圧を生成することは可能でしたが、一般的な実装でコンバータがこのような要件を満たしているとしても、敏感なレールの精度要件を満たすことは多くの場合困難です。

外部電圧源を使用してコンバータの出力範囲を拡張する一般的な方法は、一部の降圧コンバータで変更することで、通常このような構成で劣化する精度損失を回避できます。この方法と互換性があるようにするには、コンバータは複数の独立して構成可能な出力チャネルを提供し、各チャネルは同じ内部電圧リファレンスを共有する必要があります。

このアプリケーションノートでは、リファレンス電圧を下回る高精度の出力を生成するために降圧コンバータの動作原理と要件について説明し、その実装により出力精度の劣化を防止する方法を紹介し、シミュレーションおよびハードウェアでの動作例を示します。

2 動作の概念

リファレンス電圧を下回るコンバータの出力電圧を低減する方法については、アプリケーションノート [SLVA216](#) および [SLUAA00](#) で詳しく説明しています。これらの方法をレギュレータの帰還分圧器に実装する場合、外部電圧源 (V_{EXT}) を抵抗 (R_{EXT}) を介して帰還ノードに接続します。 V_{EXT} の電圧と帰還抵抗の値を変化させることで、レギュレータの出力電圧を設定できます。帰還抵抗値を設定することで、 V_{EXT} が上昇すると V_{OUT} が低下し、 V_{EXT} が低下すると、 V_{OUT} が上昇します。

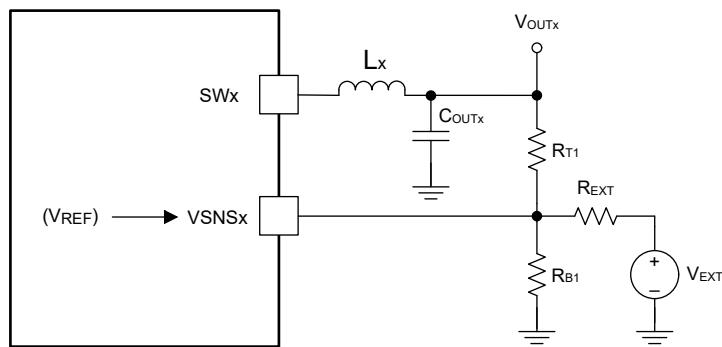


図 2-1. 3つの抵抗の概略回路図

V_{EXT} が V_{REF} より高い場合、 V_{EXT} からの電流は R_{EXT} と R_{B1} を経由して GND に流れます。 V_{EXT} から R_{B1} を介した追加の電流により、VSNS で電圧が上昇します。レギュレータの制御ループがこの電圧上昇を検出し、応答として V_{OUT} を低下させます。これにより、 R_{T1} から R_{B1} を通って電流が減少します。 R_{B1} を流れる電流が減少すると、VSNS の電圧は低下し、リファレンス電圧に戻りますが、ここで V_{OUT} がより低いレベルになります。上側の帰還抵抗を流れる電流がゼロになるように十分な電流が R_{B1} を流れることができる場合、 V_{OUT} はレギュレータのリファレンス電圧と等しくなります。 R_{EXT} を流れる電流がこのポイントを超えて増加すると、 V_{OUT} はリファレンス電圧よりも低くなります。この状態では、電流は帰還分圧器を経由して V_{OUT} から GND に流れなくなり、 V_{EXT} から V_{OUT} に、そして R_{T1} と R_{B1} を経由して GND に流れます。

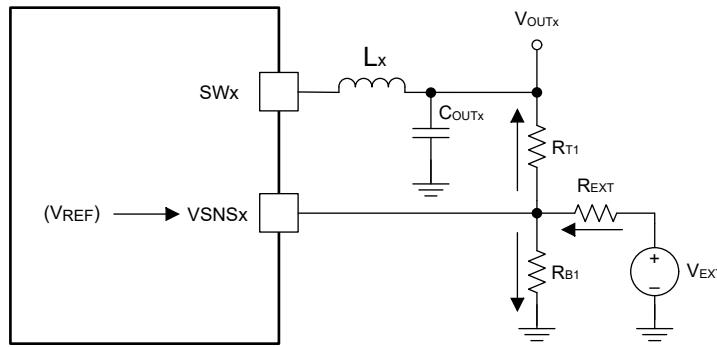


図 2-2. 電流フローを使用した概略回路図

この動作モードでは、このモードはフィードバック機能には寄与せず、エラーの原因としてのみ機能するため、**R_{B1}** は不要になります。その後、下側の抵抗を取り外して **R_{EXT}** に置き換えることができ、これによって分圧器の新しい **R_{B1}** になります。

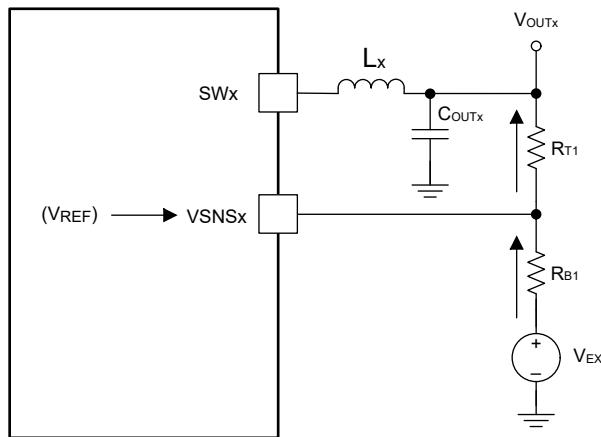


図 2-3. 2 つの抵抗の概略回路図

この新しい構成では、**V_{EXT}** と **V_{OUT}** の間に帰還抵抗分圧が形成されます。リファレンス電圧で **VSNS** を維持するためには、**V_{EXT}** の電圧が **V_{REF}** より高い場合、**R_{T1}** の両端の電圧降下に対応するために、**V_{OUT}** を **V_{REF}** より低くする必要があります。**V_{OUT}** が低下または上昇したときに、**VSNS** の電圧は依然として標準の実装とそれに比例して低下または上昇し続けるため、安定的なレギュレーションが維持されます。この構成の **V_{OUT}** は、**R_{T1}**、**R_{B1}**、**V_{REF}**、**V_{EXT}** の値によって決定されます。

$$V_{OUT} = R_{T1} \times \left(\frac{V_{REF} - V_{EXT}}{R_{B1}} \right) + V_{REF} \quad (1)$$

図 2-3 に示す構成は、外部電圧源を追加するだけで **V_{OUT}** をリファレンス電圧より低い値に制御できるため、すでに便利です。ただし、これがもたらす問題は、**V_{OUT}** の式に示されます。出力電圧は **V_{REF}** と **V_{EXT}** の両方に依存するため、レギュレータの出力精度を計算するときは両方の項の誤差を考慮する必要があります。**V_{EXT}** は正確な電圧源ではないため、この構成では **V_{EXT}** に外部電圧源を使う精度によって、レギュレータの精度は永続的に低下します。

3 出力精度の維持

多くのマルチチャネル レギュレータは、独立して生成された電圧リファレンスを使用して各出力を制御します。ただし、TPS7H410x コンバータは、デバイスのすべての出力チャネルで共有される 1 つの内部電圧リファレンスのみを生成します。この設計により、セクション 2 に示す実装の精度劣化をバイパスし、デバイス出力精度を V_{REF} 未満に制御しながら維持することができます。

デバイスの 2 番目の出力を使用して V_{EXT} を生成することで、出力精度の低下を回避できます。この構成では、 V_{OUT} と V_{EXT} を生成する両方のチャネルで 1 つの電圧リファレンスを共有する場合のみ、 V_{OUT} の精度を維持できます。2 つのチャネルが同じ電圧リファレンスを使用しない場合、外部電圧源を単純に使用した場合と比べて精度上の利点は得られません。電圧リファレンスの共有により、リファレンス電圧の変化が V_{OUT} に伝搬することで、この可能性を実現できます。 V_{REF} が低下すると、 V_{EXT} も低くなるため、 V_{OUT} が上昇します。ただし、両方のチャネルが共通のリファレンス電圧を共有するため、 V_{OUT} の V_{REF} も降下しているので、 V_{OUT} を補償のために降下させる必要があり、加算効果は相殺されます。 V_{REF} のシフトは相殺されませんが、単純に標準構成では 1 つのチャネルと同じ大きさになります。

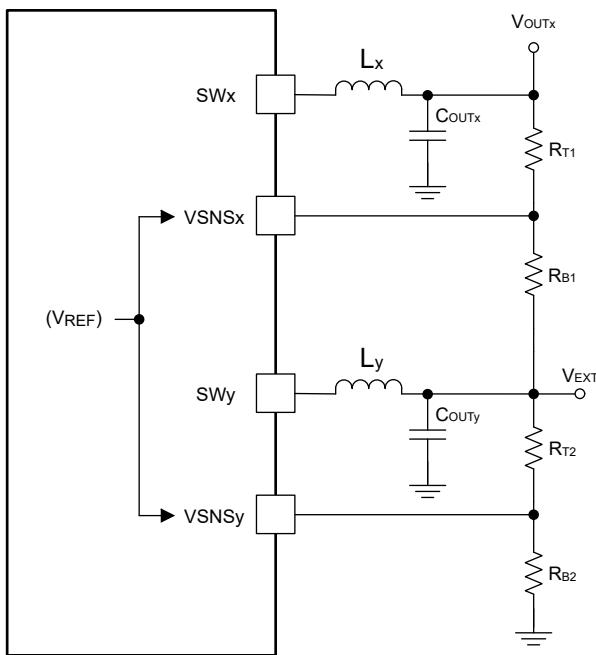


図 3-1. 完全なシステム概略回路図

$$V_{OUT} = V_{REF} \times \left(1 - \frac{R_{T1} \times R_{T2}}{R_{B1} \times R_{B2}} \right) \quad (2)$$

式 2 に、同じ電圧リファレンスを使用して V_{EXT} が他のチャネルによって生成された場合の V_{OUT} を示します。2 つの帰還分圧器からの 4 つの抵抗すべてを組み込んでおり、システム全体を使用する V_{OUT} の式が得られます。2 番目の電圧リファレンスからの項がなくなったため、すべての V_{REF} 項をグループ化して 1 つの項にまとめることができます。これにより、 V_{REF} と、両方のチャネルの帰還分割抵抗で構成される項のみに依存する V_{OUT} の式が得られます。形式は標準構成の V_{OUT} の式と同じですが、違いは 2 番目の帰還分圧器に R_{T2} と R_{B2} が追加されている点です。上の概略回路図は、両方のチャネルの帰還がどのように接続されているかを示しています。 V_{OUT} は、 V_{REF} を下回る目標出力です。

この方法には欠点があります。低電圧出力の最大精度を実現するには、 V_{EXT} を生成するために使用されるチャネルを、外部負荷に電力を供給するために使用しないでください。 V_{EXT} の電圧リップルは問題にはなりませんが、リップルは本デバイスの制御ループより少なくとも 1 枞大きい周波数を必要とするため、 V_{EXT} の外部負荷による負荷ステップにより、 V_{OUT} で摂動が発生します。したがって、デバイスで使用可能なチャネル数は実質的に 1 つ減少します。負荷に電力を供給していないチャネルを動作させる必要があるため、効率が低下します。 V_{OUT} で目的の電圧を一時的に上回ることを避けるために、 V_{EXT} を V_{OUT} と一緒に起動するか、その前に起動する必要があるため、シーケンシング要件も導入されま

す。TPS7H4104 にはチャネルシーケンシングが内蔵されているため、内部チャネルシーケンシングを利用して、 V_{OUT} に選択されたチャネルより前に起動する V_{EXT} のチャネルを選択するだけで、これを簡単に解決できます。

4 シミュレーション結果

シミュレーションは、ti.com で提供されている [TPS7H4104-SEP SIMPLIS モデル](#)を使用して構成および実行されました。 $CH2$ を V_{EXT} として、 $CH3$ を V_{OUT} として使用しました。チャネル1とチャネル4はシミュレーションでは使用されていないため、ディスエーブルになっており、図 4-1 には示されていません。 $CH2$ は元の構成から変更されておらず、出力1.2Vに設定されています。 $CH3$ は V_{REF} より低い電圧を出力するように変更され、この場合は0.5Vが選択されました。TPS7H4104EVM のデフォルト値と一致するように、 V_{OUT} ($CH3$)帰還分圧器の上側抵抗として $10.02\text{k}\Omega$ を選択しました。式 3 は、下側抵抗値を計算します。

$$R_{B1} = R_{T1} \left(\frac{V_{EXT} - V_{REF}}{V_{REF} - V_{OUT}} \right) \quad (3)$$

以下の入力を使用すると、 $R_{B1} = 61.24\text{k}\Omega$ となります。

- $R_{T1} = 10.02\text{k}\Omega$
- $V_{EXT} = 1.207\text{V}$
- $V_{REF} = 0.59948\text{V}$
- $V_{OUT} = 0.5\text{V}$

計算結果に最も近い E96 直列値として、シミュレーションの抵抗として $61.9\text{k}\Omega$ を選択しました。このシミュレーションでは、データシートのデバイスの最小オン時間仕様に違反することを避けるため、約 300kHz のスイッチング周波数も構成されました。 $CH3$ 用の RT、COMP、RSC も TPS7H4104 データシートに記載されている式を使用して構成しました。

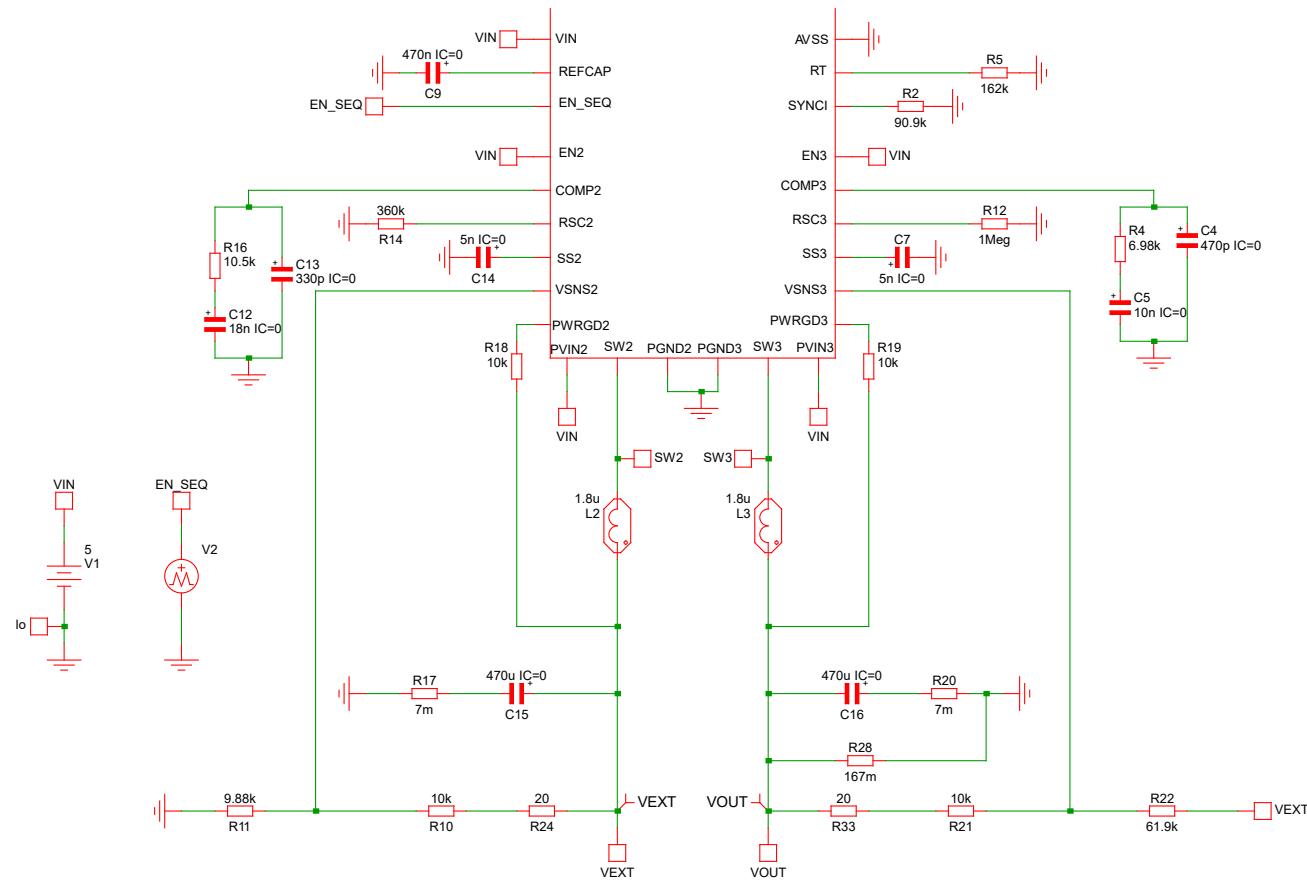


図 4-1. シミュレーション回路図

内部チャネルのシーケンシングを有効にして起動をシミュレートしました。TPS7H4104 の内部シーケンサはチャネルを番号付きの順序で起動し、 V_{REF} には CH2 を使用し、 V_{OUT} には CH3 を使用したため、 V_{EXT} がソフトスタートアップ シーケンスを完了した後でのみ V_{OUT} を有効にします。以下のプロットは、 V_{OUT} に 3A の負荷を印加した状態での、スタートアップおよび定常状態動作時の V_{OUT} と V_{EXT} を示しています。想定どおり、 V_{OUT} は 0.5V に制御され、図 4-2 に示すように V_{REF} より 100mV 低い値になります。

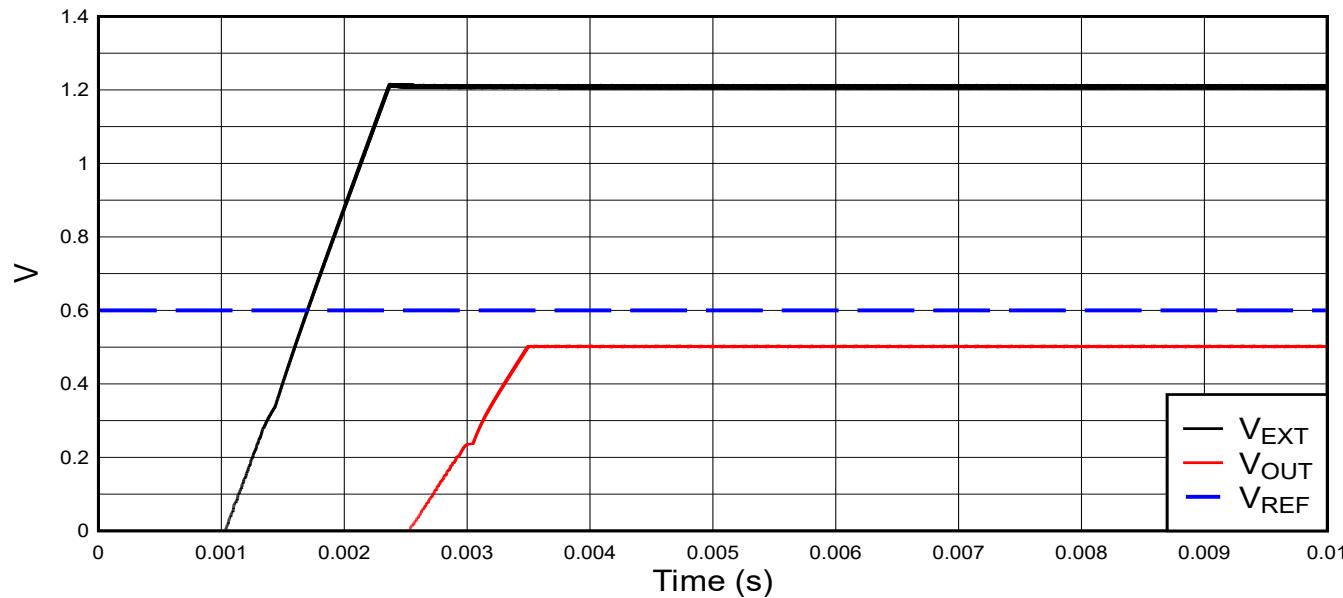


図 4-2. シミュレーションの起動の結果

シミュレーションを使用すると、シミュレーション実行の間で内部電圧リファレンスを変化させることができます。

TPS7H4104 データシートに示されている最小値、標準値、最大値に V_{REF} を設定し、シミュレーションの 6ms ~ 10ms の V_{OUT} の RMS 値を記録しました。表 4-1 に、 V_{OUT} の RMS 値と、対応する V_{REF} 値を示します。標準値からのシフトのパーセンテージは、 V_{REF} および V_{OUT} についても計算されます。

表 4-1. V_{REF} から V_{OUT} への誤差の伝搬

値	V_{REF} (mV)	V_{REF} の変化 (%)	V_{OUT} (mV)	V_{OUT} の変化 (%)
標準値	599.48	-	501.04	-
最小値	591.50	-1.33%	494.38	-1.33%
最大値	603.50	0.67%	504.40	0.67%

表 4-1 は、 V_{REF} の変化が、余分な誤差を加えずに V_{OUT} に伝搬されることを示しています。したがって、 V_{REF} が 1% 変化すると、 V_{OUT} が 1% 変化します。この動作は、セクション 3 に示した V_{OUT} の式と一致します。 V_{OUT} に誤差に寄与する V_{REF} の項は 1 つしかないためです。これは、 V_{REF} 以上に制御されるシングルチャネル設定で見られる V_{REF} からの誤差と同じであるため、同じ精度を維持しながら V_{REF} より低く制御するチャネルを作成するという目標を達成しています。

4.1 V_{EXT} 出力偏差の影響

動作中は、ライン過渡、負荷過渡 (V_{EXT} が負荷されている場合)、放射線による単一イベント過渡などの外部要因により、 V_{EXT} が公称 DC 値から逸脱する可能性があります。TPS7H4104-SEP の SEE レポートである「[TPS7H4104-SEP のシングルイベント効果 \(SEE\) 放射線レポート](#)」は、重イオンビームを使用した TPS7H4104-SEP テストの結果について説明しています。大きさが 3% 以上の設定イベントは観測されていませんが、シミュレーションでは理論上の 3% 過渡が V_{EXT} に誘導され、さまざまな公称レベルの V_{EXT} で V_{OUT} への影響が観測されています。

このシミュレーションでは、 $10\mu s$ の立ち上がり / 立ち下り時間を使用して、 -3% の過渡を V_{EXT} レールに直接注入しています。3 種類の異なる公称 V_{EXT} レベルをテストし、各 V_{EXT} 条件の過渡振幅を公称値の -3% に調整しました。[図 4-3](#) に、1 つのプロットに表示された 3 つの V_{EXT} レベルすべての結果を示します。

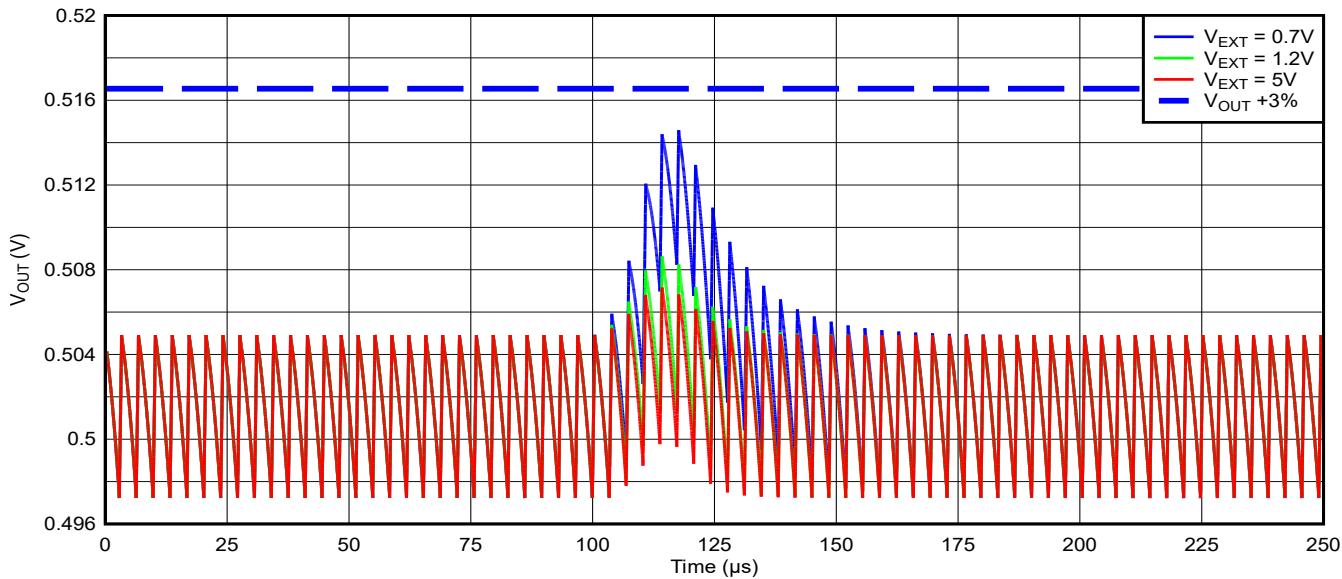


図 4-3. V_{OUT} の V_{EXT} 過渡のシミュレーション結果

上記のプロットは、 V_{EXT} の値が大きい場合、公称電圧からの偏差が同じ割合だと V_{OUT} の外乱が小さくなることを示しています。この非直観的な関係の原因是、 R_{B1} の両端での電圧降下と V_{REF} 電圧です。 R_{B1} を流れる電流は、GND と V_{EXT} の間の総電位ではなく、 V_{EXT} と V_{REF} の間の電位で決定されます。 V_{EXT} のアップセットの大きさは V_{EXT} から GND への電圧によって決定されるため、 V_{EXT} から V_{REF} を減算すると、 V_{EXT} の小さい値でアップセットの割合が大きくなります。これは、 V_{REF} が値の大部分を占めるためです。

さらに、セクション 3 で説明し、セクション 4 でシミュレーションしたものと同様の構成で、 V_{EXT} と低電圧出力チャネルを備えた変更後の TPS7H4104EVM を、LET が 75MeV の重イオンビームに曝しました。 V_{OUT} では、大きさが 2.5% を超える設定イベントは観測されませんでした。

5 TPS7H4104EVM を使用したテスト結果

シミュレーション以外でこの構成を検証するために、TPS7H4104EVM 評価基板を変更し、CH3 で 0.5V を出力しました。前のシミュレーションと同様に、CH2 によって生成された 1.2V 出力を、CH3 帰還分圧器の V_{EXT} として使用しました。この構成を実装するには、評価基板に 4 つの変更が必要です。これらの変更点を 図 5-1 では赤色で囲んでいます。

- R22 は、本デバイスのスイッチング周波数を約 300kHz に設定するため交換しました。
- 帰還分圧器の GND への接続を外すため、R17 を実装しました。
- R33 は、 R_{B1} として使用するために実装されています
- V_{EXT} は R_{B1} に接続されています。

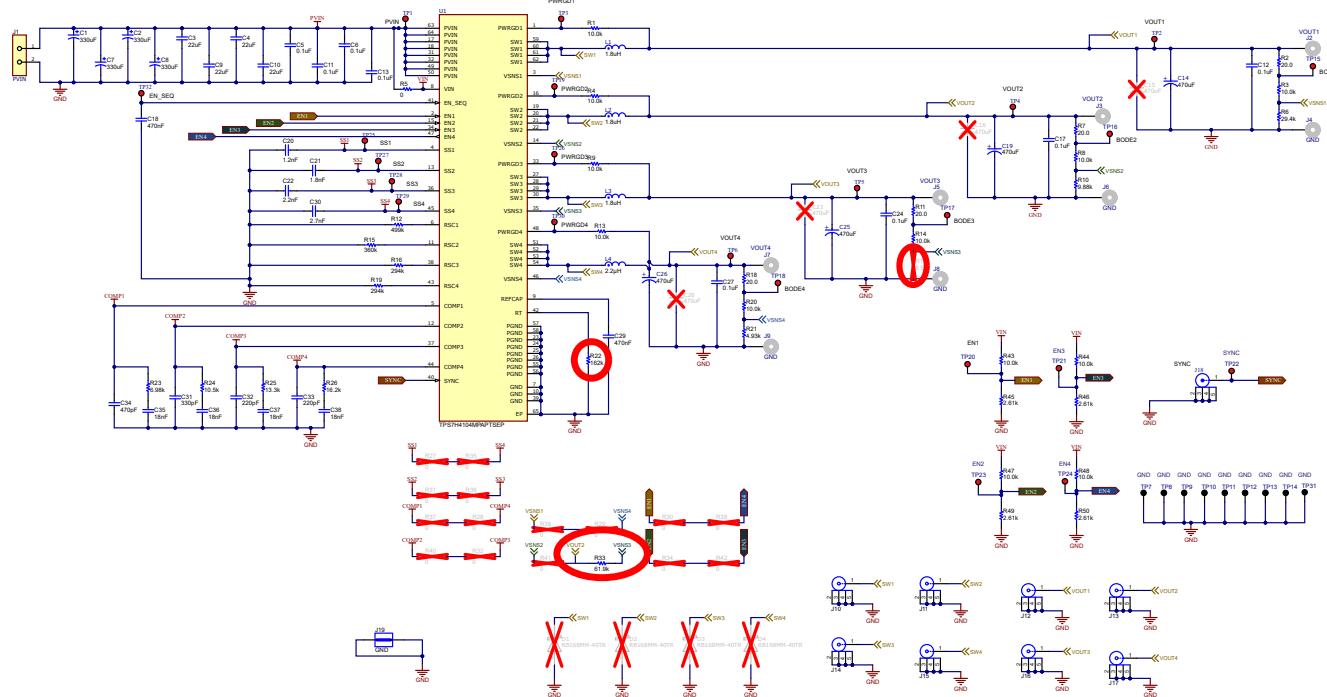


図 5-1. 変更済み評価基板の回路図

図 5-2 に、R17 の場所を示します。

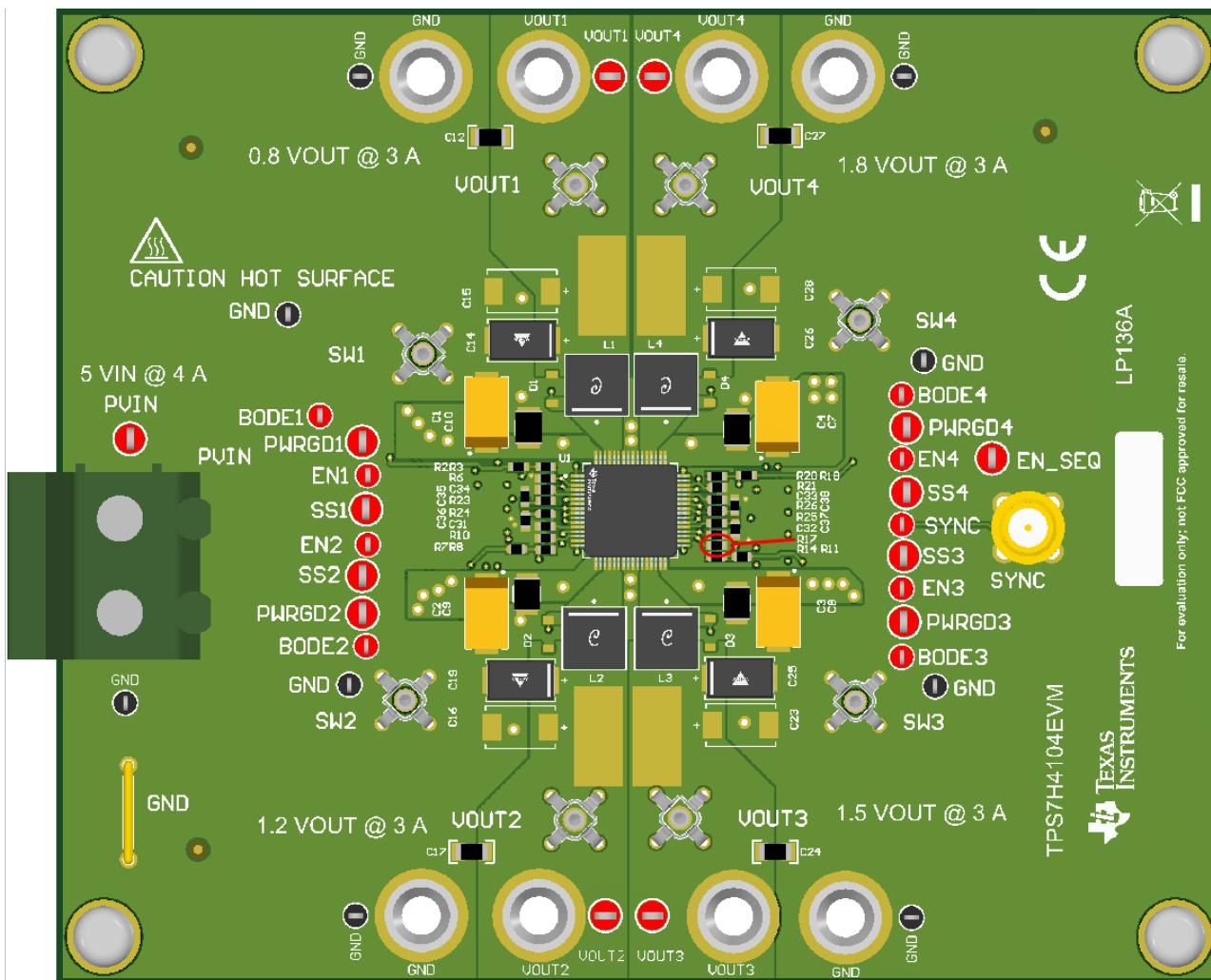


図 5-2. 評価基板の上面ボードレンダリング

評価基板の底面に対する変更を [図 5-3](#) に示します。R33 (RB1) が実装されている場合、1 つのパッドはビアを経由して VSNS3 に接続され、もう 1 つのパッドは R41 につながるパターンに接続されます。R41 は実装されていないため、R41 の左側のパッドは、外部配線を介して VOUT2 (V_{EXT}) に接続できます。これは、VOUT2 テストポイントの底面に接続することで行います。R33 を R41 に接続するパターンによって R_{B1} に V_{EXT} が提供されるようになり、変更済み帰還回路が完成します。

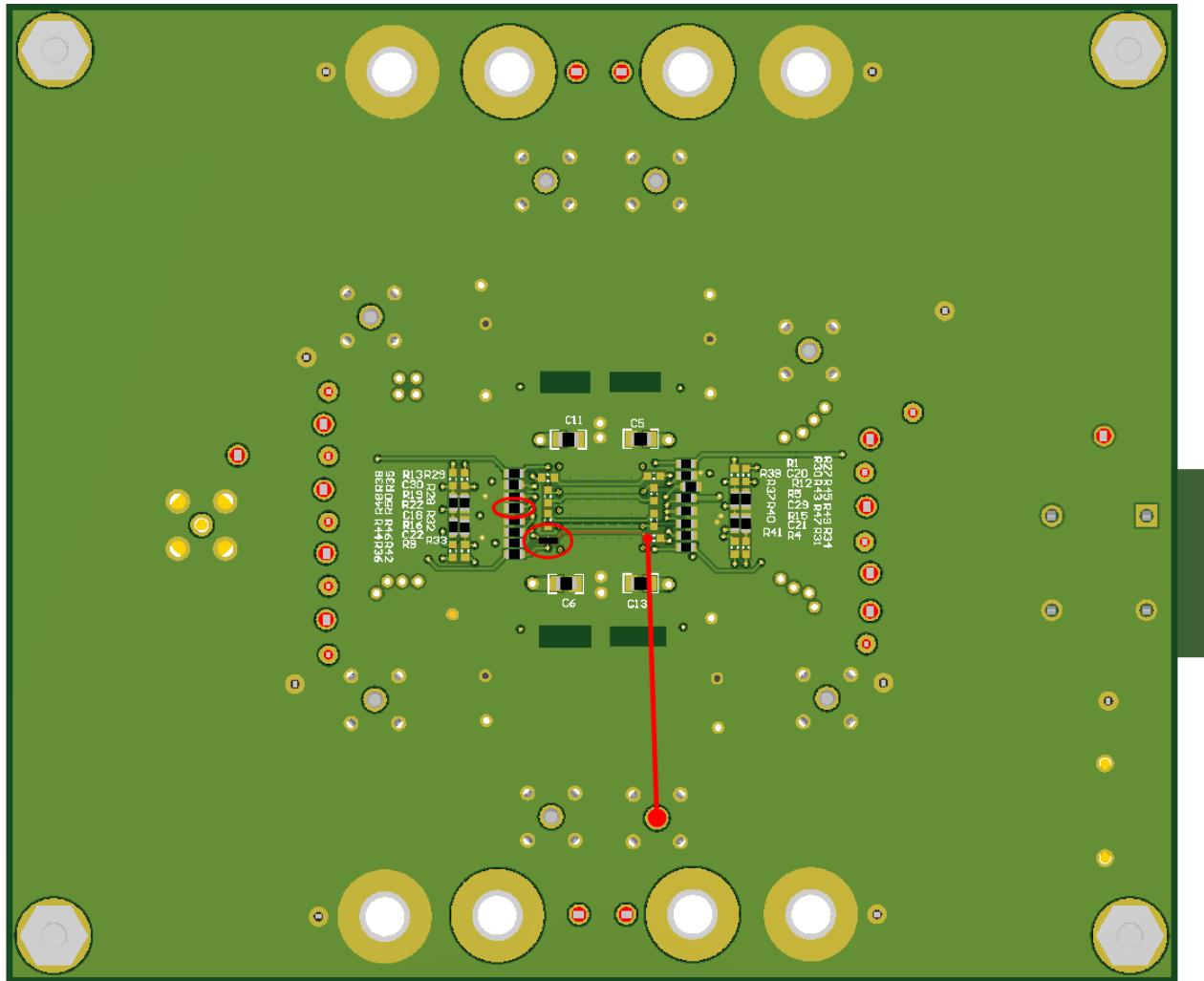


図 5-3. 評価基板の底面ボードレンダリング

内部シーケンサが有効の状態で変済みの評価基板の電源をオンにし、 V_{OUT} に 3A の負荷をかけてスタートアップを記録しました。

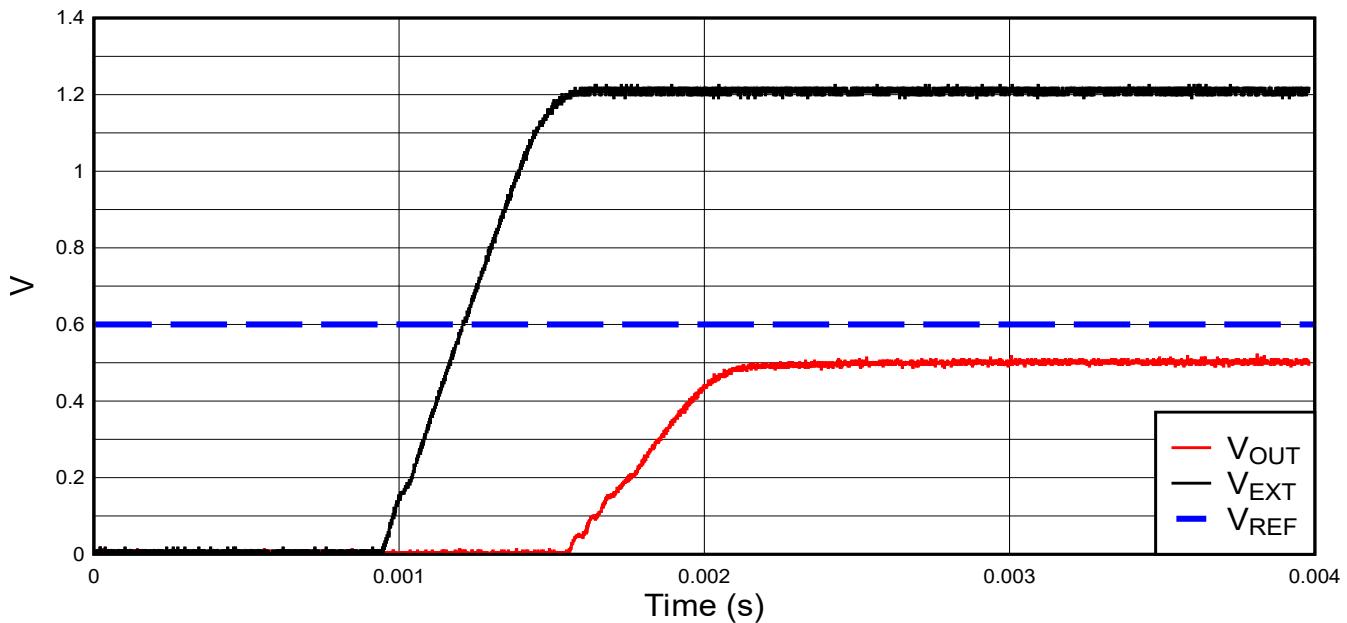


図 5-4. 評価基板のスタートアップの結果

予想どおり、変更した評価基板の出力は 図 4-2 のシミュレーション結果とほぼ一致しており、CH2 から生成された 1.2V の V_{EXT} を使用して、CH3 に 0.5V の出力を供給します。

6 まとめ

降圧コンバータのリファレンス電圧よりも低い電圧レールで電圧レールを必要とするアプリケーションの場合、実証済みの回路を外部リファレンス電圧を使用して実装し、より低い電圧を制御することができます。リファレンス電圧より低いレールでも精度を維持することが重要である場合、TPS7H4104 などの単一の内部リファレンス電圧を使用するマルチチャネルレギュレータは、出力の一つを使用して外部リファレンス電圧を生成するように構成できます。これにより、外部リファレンス電圧によって外部誤差が発生することではなく、追加の部品数を最小限に抑えながら出力精度を維持します。このアプリケーション ノートでは、このようなシステムの動作原理について詳しく説明し、TPS7H4104 を使用したシミュレーション結果を示します。また、記載された高精度のサブリファレンス出力を生成するために TPS7H4104EVM を変更する方法について詳しく説明します。

7 参考資料

- テキサス インスツルメンツ、「[外部リファレンス電圧を使用した 1.2V 未満の \$V_{OUT}\$ のレギュレーション](#)」アプリケーション ノート。
- テキサス インスツルメンツ、「[リファレンス電圧よりも低い出力電圧の受信方法](#)」、アプリケーション ノート。

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、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