

Application Brief

非同期整流昇圧コンバータ設計における軽負荷状況でのパルススキップ動作の回避



Niklas Schwarz

Boost Converters and Controllers

はじめに

同期整流昇圧コンバータは、固定のパルス幅変調(FPWM)動作でハイサイドスイッチを流れる負の電流を許容できますが、非同期コンバータはダイオードを使用して、逆方向の電流をブロックします。また、各コンバータにはドライバの最小オン時間があります。つまり、各スイッチングサイクルで出力に伝送される電力が最小限に抑えられます。軽負荷の状況では、必要な出力電力が各サイクルで供給される電力よりも小さい場合があります。そのため、過剰な電力が発生すると出力電圧が上昇します。出力電圧の上昇を回避するため、この状況ではコンバータはスイッチングを停止し、パルススキップモードに移行します。

パルススキップモードは効率が向上するという利点がありますが、デバイスが固定周波数でスイッチングを停止するという悪影響があります。出力電圧リップルの増加とEMI性能の低下は設計目標と矛盾する可能性があるため、パルススキップモードがすべてのアプリケーションに適しているわけではありません。

非同期コンバータは、必要なデューティサイクル(したがってドライバのオン時間)がデバイスでサポートされている最小オン時間を下回らない限り、固定周波数で動作を維持します。最小オン時間は、データシートの電気的特性に規定されています。一定の出力電圧を維持するためにデューティサイクルを小さくする必要がある場合、デバイスは最小オン時間に達するまでデューティサイクルを低下させ、その後、出力電圧が目標値を超えるとすぐにスキップモードに移行します。スキップモードの正確な条件は、デバイスによって異なる場合があります。

たとえば、LM3478は、出力電圧が過電圧保護(OVP)スレッショルドまで上昇する間は最小オン時間で動作を維持した後、スタンバイ状態に移行し、 V_{OUT} がヒステリシススレッショルド未満に低下するまでデバイスはスイッチングを停止します。LM5158などの新しいデバイスでは、OVPのフィードバック電圧を監視するだけでなく、COMPピンと電流センスピンの電圧レベルも監視することで、COMPレベルが特定のスレッショルドを下回ったときにスキップモード動作に移行するための V_{OUT} リップルが小さくなります。

実装

式1は必要なデューティサイクルを計算し、式2はドライバのオン時間を計算します。

$$D_{DCM} = \frac{1}{V_{IN}} \times \sqrt{\frac{2L \times (V_{OUT} - V_{IN})}{T_S} \times I_{OUT}} \quad (1)$$

$$t_{on} = D \times T_S = D \times \frac{1}{F_{SW}} \quad (2)$$

ここで、

- D_{DCM} は不連続導通モードでのデューティサイクルです
- t_{on} は、ゲートドライバのオン時間です

入力電圧(V_{IN})と出力電圧(V_{OUT})はアプリケーション要件で規定されており、最小オン時間はデバイスの仕様で規定されています。ダミー負荷を追加することで出力負荷(I_{OUT})を増やすことができますが、全体的な効率が低下します。インダクタンス(L)とスイッチング周波数(F_{SW})は、より自由に調整できるパラメータです。

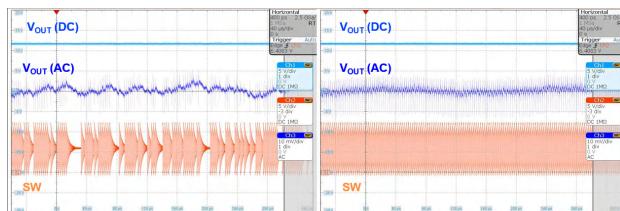
スイッチング周波数が低速になると、ドライバのオン時間とオフ時間の両方が増加しますが、デューティサイクルには影響しません。コントローラの最小オン時間は絶対値(ナノ秒)であるため、この方法ではパルススキップを回避できます。

ただし、LM515xシリーズには、スイッチング周波数に応じて変化する最小オン時間パラメータがあることに注意してください。これにより、 F_{SW} の変更による影響を低減できます。

インダクタンスを大きくすると、デューティサイクルが直接増加し、これによってドライバのオン時間が長くなります。インダクタンスが大きくなると、部品サイズが大きくなつて、ループ応答の帯域幅制限が強くなり、高負荷時の電流リップルが小さくなるという欠点があります。後者の場合、高負荷動作時には不安定になるリスクが伴います。これは、ピーク電流モード制御では、適切な電流センススロープを読み取るためにある程度の電流リップルが必要となるためです。

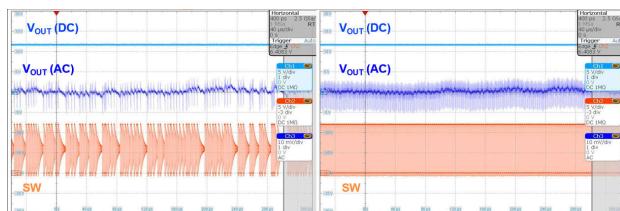
テスト結果

LM5158 昇圧コンバータ デバイスの最小オン時間は、2.2MHz スイッチング周波数で 80ns (標準値) です。このデバイスでは、スイッチング周波数が低いほど最小オン時間が長くなります。正確に言うと、スイッチング周波数が高くなると必要な最小オン時間が短くなり、コンバータの最小オン時間機能と直接一致するため、 F_{SW} が変化したときのパルススキップ動作に差は見られません。



パラメータ: $F_{SW} = 400\text{kHz}$ 、インダクタンス = $1.5\mu\text{H}$ 、負荷 = 10mA (左) | 40mA (右)

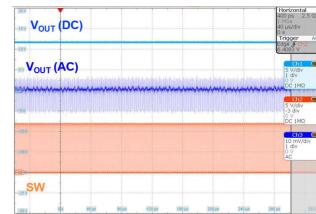
図 1. 低スイッチング周波数設定 (400kHz) でのスキップモード (左) と連続動作中 (右) の LM5158 昇圧 EVM



パラメータ: $F_{SW} = 2.1\text{MHz}$ 、インダクタンス = $1.5\mu\text{H}$ 、負荷 = 10mA (左) | 40mA (右)

図 2. 高スイッチング周波数設定 (2.1MHz) でのスキップモード (左) と連続動作中 (右) の LM5158 昇圧 EVM

ただし、LM5158 設計でインダクタンスを大きくすると、スキップモードのスレッショルドがより低い負荷にシフトするという予想通りの変化が見られます。この場合、この設計では、ゼロ負荷状態でも PWM 動作を継続します。

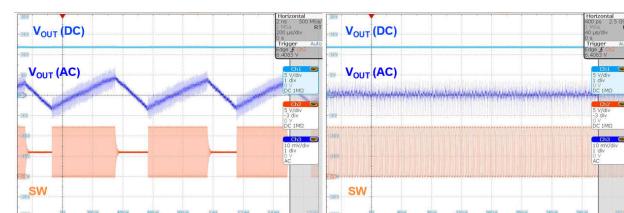


パラメータ: $F_{SW} = 2.1\text{MHz}$ 、インダクタンス = $10\mu\text{H}$ 、負荷 = 0mA

図 3. 高インダクタンスで連続動作中の LM5158 昇圧 EVM 動作

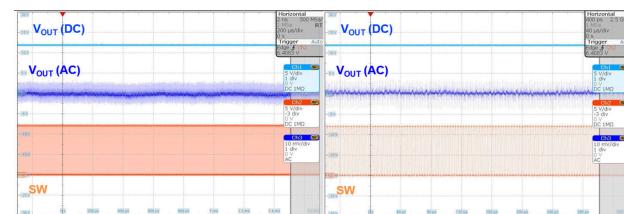
LM3481 の最小オン時間は、スイッチング周波数に対して変化しません。このため、スイッチング周波数を高くした後で、別のスキップモードスレッショルドが観測されます。

インダクタンスを大きくすると、スキップモードのスレッショルドシフトも同じ結果が表示されます。



パラメータ: $F_{SW} = 475\text{kHz}$ 、インダクタンス = $10\mu\text{H}$ 、負荷 = 10mA (左) | 40mA (右)

図 4. 低スイッチング周波数設定 (475kHz) でのスキップモード (左) と連続動作中 (右) の LM3481 昇圧 EVM



パラメータ: 左: 負荷 = 10mA 、 $F_{SW} = 1\text{MHz}$ 、インダクタンス = $10\mu\text{H}$ | 右: 負荷 = 10mA 、 $F_{SW} = 475\text{kHz}$ 、インダクタンス = $47\mu\text{H}$

図 5. 高スイッチング周波数設定 (左) または高インダクタンス (右) で連続動作中の LM3481 昇圧 EVM

まとめ

軽負荷状態での V_{OUT} の増加を避けるため、非同期整流昇圧設計ではパルススキップ動作が必要です。同期整流昇圧設計でも、軽負荷時の効率を向上させるにはスキップモード動作が有効です。この現象は、SEPIC やフライバックコンバータなどの他のトポロジでも見られます。

予測されるオン時間と、この値をデバイスの最小オン時間制限よりも大きくできるパラメータを計算する式を理解すると、すべての動作条件でパルススキップ動作を回避できる可能性のある設計調整がわかります。

参考資料

テキサス インスツルメンツ、『DC/DC 昇圧コンバータの中身』、Brian T. Lynch

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](#) やかかるテキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツ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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

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