

Application Note

LLC コントローラのバースト モードにおけるゼロ電流スイッチングの問題



Joy Cho

概要

テレビおよびモニタのスイッチ モード電源 (SMPS) は一般に、絶縁型 DC/DC 電力変換段で LLC トポロジを使用します。その理由は、この共振トポロジで達成できる非常に高い効率と高い電力密度によるものです。バースト モードで動作する LLC に伴う課題の 1 つは、可聴ノイズを最小化することです。もう 1 つは、バースト モードの開始または終了時にゼロ電流スイッチング (ZCS) が発生するのを防止することです。これは、UCC256404 によるバースト モード動作を改善する方法の例を示しています。

目次

1 はじめに.....	2
2 LLC トポロジ設計の理論.....	2
3 バースト モード動作制御機構.....	3
4 バースト モードを終了するときに ZCS の問題が発生する可能性があります.....	4
5 バースト遷移期間時の ZCS の問題を解決するための外部回路設計.....	5
6 正確な外部回路を設計し、バースト遷移期間時の ZCS 問題を解決_ (オプション).....	6
6.1 バースト遷移期間時の ZCS 問題を解決するための外部回路のテスト結果.....	7
7 まとめ.....	8
8 参考資料.....	8
9 改訂履歴.....	9

図の一覧

図 2-1. LLC 共振コンバータ.....	2
図 3-1. UCC256404 によるバースト モードのスイッチング パターン.....	3
図 3-2. UCC256404 によるバースト モード制御の内部ブロック.....	3
図 4-1. バースト動作条件での ZCS 動作発行メカニズム.....	4
図 5-1. UCC256404 による外部自動スタンバイ回路.....	5
図 6-1. UCC256404 による高精度の外部自動スタンバイ回路.....	6
図 6-2. ローサイド電流の波形 (回路なし).....	7
図 6-3. ローサイド電流ズームの波形 (回路なし).....	7
図 6-4. ローサイド電流の波形 (回路あり).....	7
図 6-5. ローサイド電流ズームの波形 (回路あり).....	7

表の一覧

表 6-1. 自動スタンバイ出力電流レベル.....	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

このアプリケーション ノートを作成した時点で、テレビが DoE Level VI および CoC Tier 2 規格を満たすための現在の要求事項は、TV がオフのときのスタンバイ電力を 500mW 未満にすることです。LLC トポロジは共振を実現できる周波数範囲が限られているため、軽負荷時にバースト モードに移行して消費電力を最小化するのが最適な選択肢です。

UCC256404 は、可聴ノイズを最小限に抑えるため、ソフトインおよびバースト モードのソフトアウトを備えています。バースト モードの開始または終了時の課題は、すべての条件下でゼロ電流スイッチング (ZCS) が回避されるようにすることです。ZCS (ゼロ電流スイッチング) は、LLC にとって望ましくない動作モードであり、回路障害を招くこともあります。このアプリケーション ノートの目的は、バースト モードでスタンバイ電力性能を動的に調整する方法を示すことです。

2 LLC トポロジ設計の理論

LLC 共振コンバータは、直列共振コンバータ (SRC) をベースにしています。トランスの磁化インダクタを使用することで、広い範囲の入力電圧と負荷にわたってゼロ電圧スイッチングを実現できます。LLC トポロジは共振で動作するため、常に 50% のデューティ サイクルで動作します。したがって、負荷への電力を制御する唯一の方法は、共振周波数を変更することです。この周波数範囲は、図 2-1 に示すように、LM、LR、CR によって定義される共振タンクによって制限されます。LLC コントローラは、公称入力電圧において、共振周波数で動作するときに、最高の効率を実現します。スイッチング周波数が低くなると、電圧ゲインは大幅に増加します。これにより、入力電圧が低下しても、コンバータはレギュレーションを維持できます。たとえば、軽負荷時の電力をさらに最小化するために PFC がディセーブルになっている場合です。共振コンバータの性質上、共振部品すべての電圧と電流はほぼ正弦波です。LLC 共振コンバータのゲイン特性は、第 1 高調波近似 (FHA) に基づいて分析されます。これは、すべての電圧と電流が、スイッチング周波数と同じ周波数を持つ正弦波形状として扱われることを意味します。FHA は、次の図 2-1 に示すように、LLC 電力段を正弦波入力電圧 (VS) としてモデル化し、実効負荷抵抗 RL を駆動します。

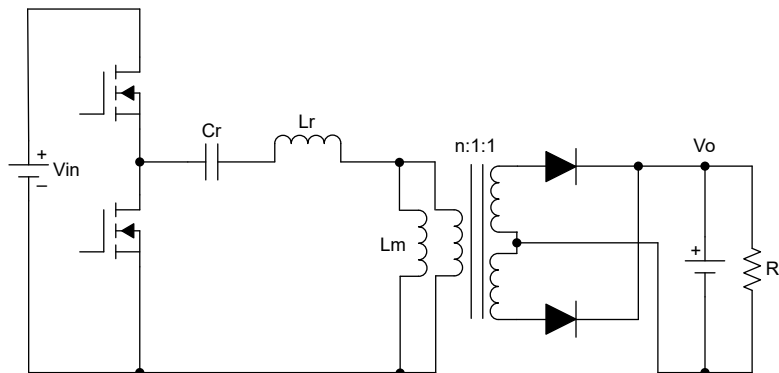


図 2-1. LLC 共振コンバータ

3 バースト モード動作制御機構

他のパワー コンバータと同様に、LLC コンバータ電力段の効率は出力電力によって急速に低下し、妥当な軽負荷効率を維持するために、LLC コンバータはバースト モードで動作します。このモードでは、LLC コンバータが短いバースト期間に比較的高電力で動作し、その後一定時間スイッチングが停止します。バースト期間中に、過剰電荷を出力容量に移して蓄積します。バースト オフ期間中は、この蓄積した電荷を使用して負荷電流を供給します。スタンバイ時の消費電力の厳格な要件を満たすには、バースト モード動作が不可欠です。バースト モード動作に伴う課題の 1 つが、可聴周波数のノイズ特性です。一定の時間にわたってスイッチングを停止する必要があるために、20Hz ~ 20kHz の可聴周波数範囲内の周波数のスイッチング パルス パターンが存在します。UCC25640x の一部のバリエーションには、最初および最後のいくつかのスイッチング パルスでソフトオン/ソフトオフ期間付きバースト モードがあり、スタンバイ動作時の可聴ノイズを最小限に抑えることができます。2 つのバースト モード スレッシュホールドを使用して、バースト モードの開始と終了を制御します。BMTL はバースト モード スレッシュホールド Low を表し、これはバースト モードに移行するためのスレッシュホールドとして使用されます。BMTL はバースト モード スレッシュホールド High を表し、これはバースト モードを終了するためのスレッシュホールドです。図 3-1 に示すように、FBreplca という名前の内部帰還信号がこの 2 つのスレッシュホールドと比較され、バースト モード動作を決定します

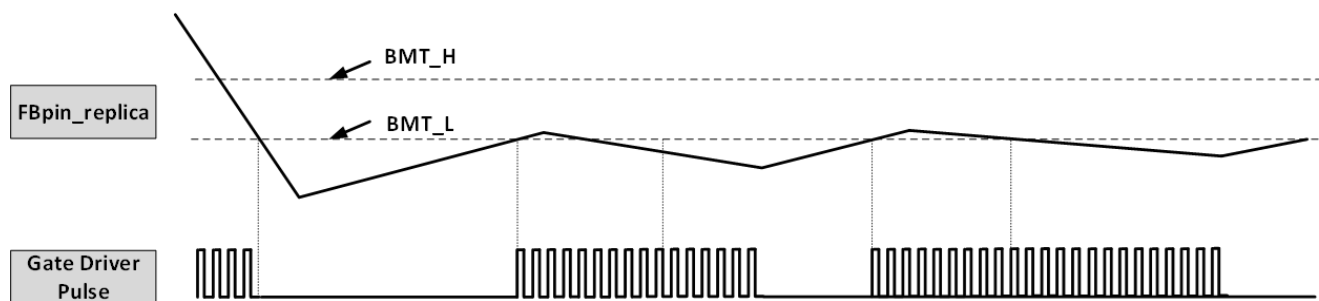


図 3-1. UCC256404 によるバースト モードのスイッチング パターン

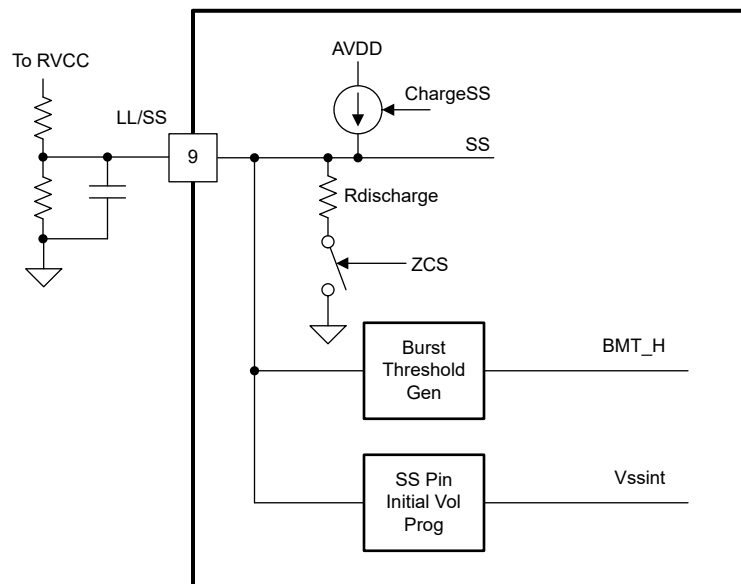


図 3-2. UCC256404 によるバースト モード制御の内部ブロック

4 バースト モードを終了するときに ZCS の問題が発生する可能性があります

バースト パケットが互いに近すぎる場合、ZCS が発生する可能性があります。これは、バースト モードから出る前にオフ時間が短いときに発生する可能性があり、スイッチング ノードで依然としてリングングが発生している場合に、電流スパイクによってローサイドがオンになる可能性があります。図 4-1 に、バースト パケットが互いに接近したときに ZCS 問題が発生する方法を示します。

1. バースト オフ期間が短い場合、ZCS 状態でバースト パケットの最初のパルスがオンになることがあります
2. スwitchング ノードを減衰させ、ZCS なしでバースト パケットの最初のパルスをオンにできる場合に、最小バーストオフを設計することができます

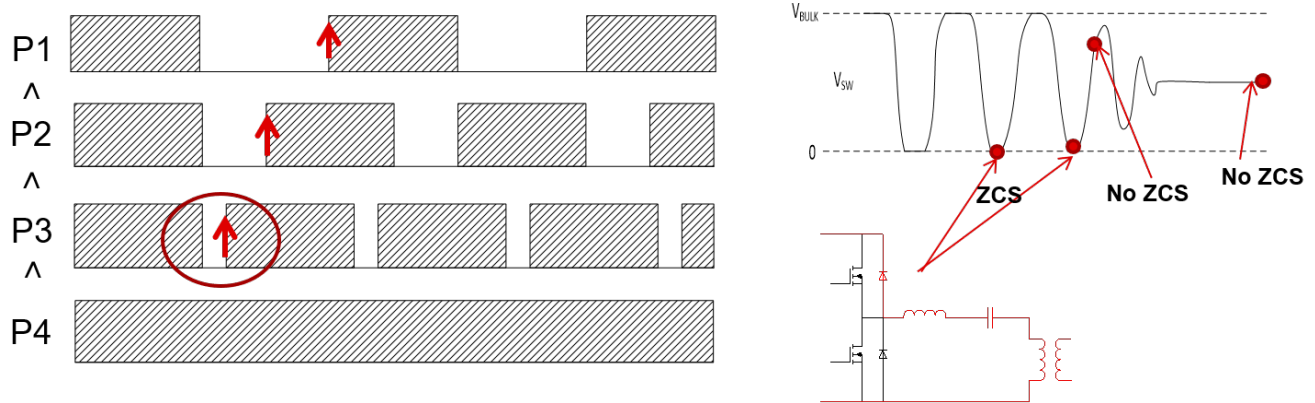


図 4-1. バースト動作条件での ZCS 動作発行メカニズム

5 バースト遷移期間時の ZCS の問題を解決するための外部回路設計

以下の自動スタンバイ回路により、スイッチング ノードが減衰されたときの最小バースト オフが $200\mu\text{s}$ であり、バースト パケットの最初のパルスが ZCS なしでオンになることを保証できます。図 5-1 に、自動スタンバイ外部回路により、バースト 遷移期間時の ZCS 問題を最小限に抑える方法を示します。

UCC256404 による外部自動スタンバイ回路の動作機構の詳細を以下に示します。

1. 高負荷条件では PFC を自動的にオンにし、バースト モードをディセーブルするには、回路を使用します。
2. INA は、出力電源レールの電流センス両端の電圧を昇圧します
3. INA 出力が基準電圧を上回ると、コンパレータ出力が High になります。小さな FET ターンオンにより、LL/SS ピンの 1 次側にフォルト信号が送信されます。
4. 負荷が大きくなると、バーストパケット間での最小時間が確実に維持されるように、バースト モードをディセーブルします

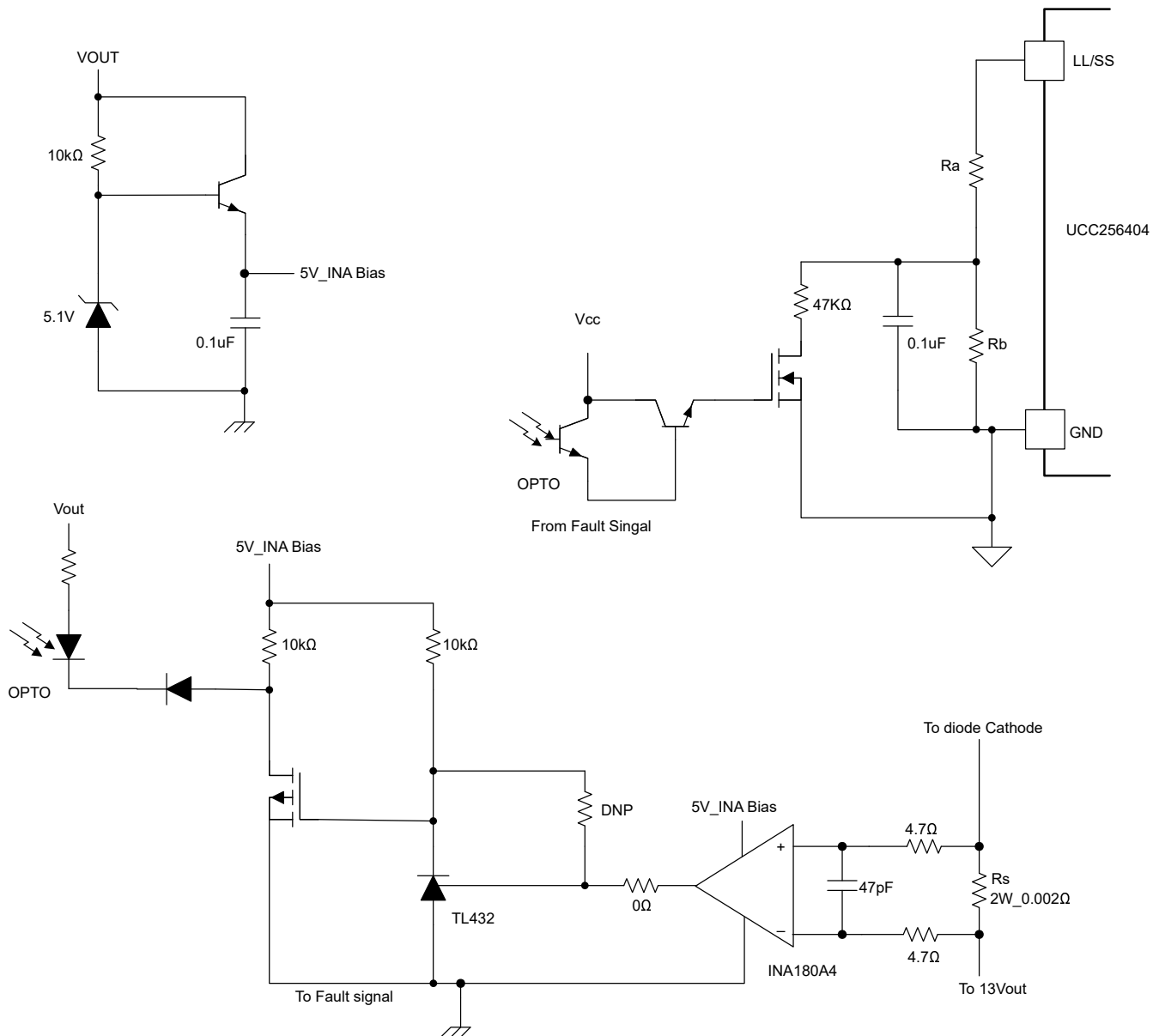


図 5-1. UCC256404 による外部自動スタンバイ回路

6 正確な外部回路を設計し、バースト遷移期間時の ZCS 問題を解決_ (オプション)

これは、自動スタンバイ機能の正確な動作のために外部回路をより詳細に設計するために必要です。回路がすべての AC 電圧範囲条件 (90Vac ~ 264Vac) で正確に動作できるように、回路を次のように変更しました。FAULT 信号出力回路は、図 6-1 に示すように設計され、小信号 FET とシャントレギュレータ構成をオペアンプ構成に変更して、バースト遷移期間における ZCS 動作を向上させ、自動スタンバイ動作をより正確にすることができます。

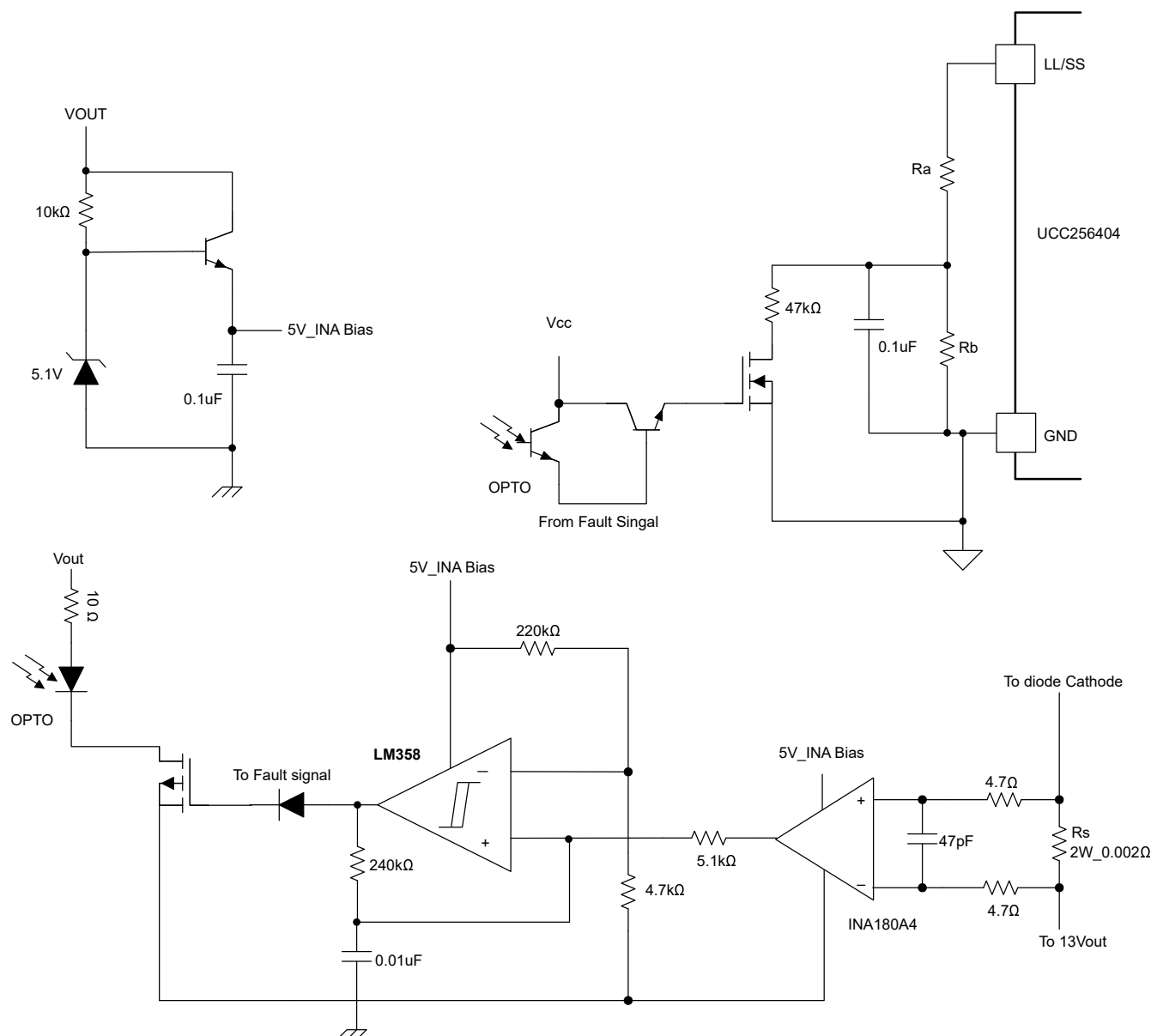


図 6-1. UCC256404 による高精度の外部自動スタンバイ回路

6.1 バースト遷移期間時の ZCS 問題を解決するための外部回路のテスト結果

表 6-1 に、自動スタンバイ出力電流レベルの外付け回路部品の値の設定を示します

表 6-1. 自動スタンバイ出力電流レベル

負荷条件	バーストモード設定	最大バーストオフ期間係
0.25A 超	バーストはありません	0
0.25A 未満	0.25A より大きい電力でバースト	大型

以下の波形は、外部の自動スタンバイ回路がない場合と外部の自動スタンバイ回路がある場合のものです

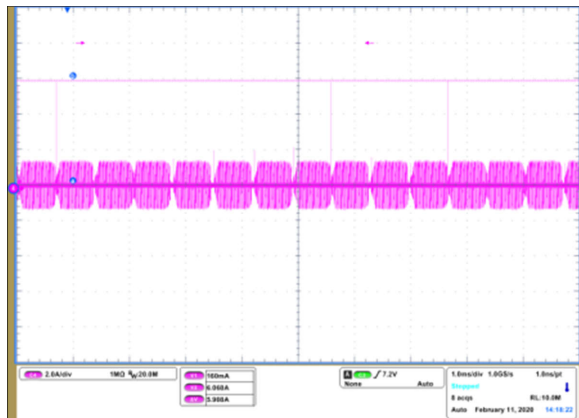


図 6-2. ローサイド電流の波形 (回路なし)

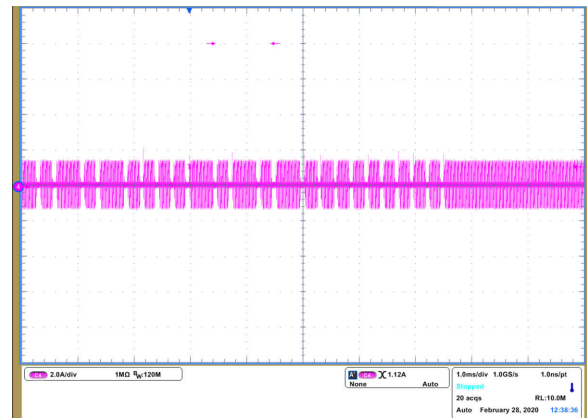


図 6-3. ローサイド電流ズームの波形 (回路なし)

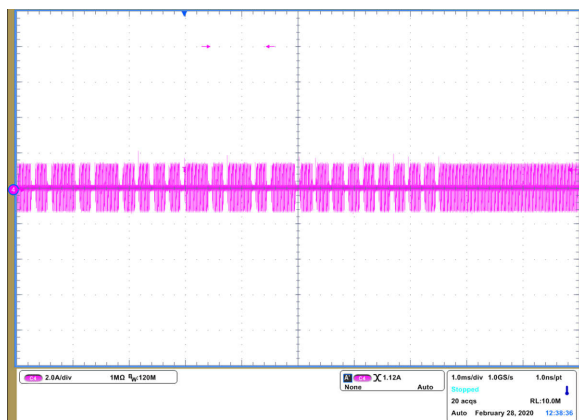


図 6-4. ローサイド電流の波形 (回路あり)

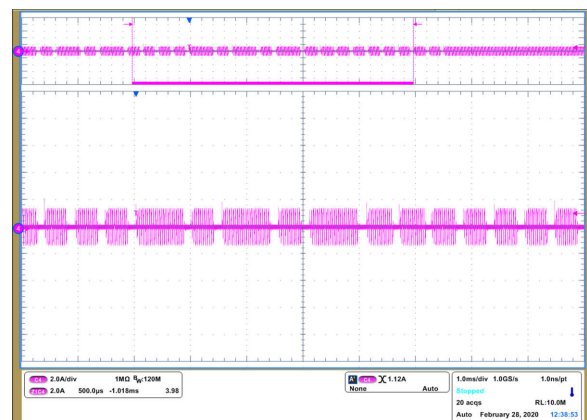


図 6-5. ローサイド電流ズームの波形 (回路あり)

7 まとめ

本書に記載した自動スタンバイ外部回路設計を適用した後の波形テストと測定の結果、2つのスイッチング バースト パケットが閉じているバースト モード遷移期間条件に加えて出力電流でも **ZCS** 問題が発生しないようにこの回路は動作します。また、自動スタンバイレベルは定格値に応じて調整できることも示されています。したがって、これは、**90Vac** から **264Vac** までのすべてのテスト条件で、自動スタンバイ外部回路によって通常の動作性能が達成されていることがわかります。

8 参考資料

- テキサス インストルメンツ、[超低可聴ノイズ、超低スタンバイ電力の UCC25640x LLC 共振コントローラ](#)、データシート

9 改訂履歴

Changes from Revision * (September 2024) to Revision A (April 2025)	Page
• ドキュメント全体にわたって表、図、相互参照の採番方法を更新.....	1
• 「UCC256404 による外部自動スタンバイ回路」画像を変更.....	5
• 「UCC256404 による高精度の外部自動スタンバイ回路」画像を変更.....	6

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、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](https://www.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

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、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](https://www.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