

Application Note

UCC25661x を使用したフル ブリッジ LLC



Amrita Mitra, Sanchayan Das, Aditya Madhavan

概要

このアプリケーション ノートでは、UCC25661x LLC コントローラを使用したフル ブリッジ LLC 共振コンバータの実装について説明します。このコントローラは主にハーフ ブリッジ アプリケーションを想定しているので、フル ブリッジ動作に必要なゲートドライブ信号や機能を生成するために、追加の回路が採用されています。

目次

1 概要.....	2
2 フル ブリッジ LLC の動作原理.....	3
3 UCC25661x を使用した実装.....	4
3.1 ゲートドライブ アーキテクチャ.....	4
3.2 ISNS 回路の変更.....	5
3.3 補助ロジックの実装.....	6
3.4 ロジックレベル信号変換.....	6
4 ハードウェア評価結果.....	9
5 まとめ.....	12
6 参考資料.....	12
7 改訂履歴.....	13

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 概要

LLC 共振コンバータは、広い負荷範囲にわたってソフトスイッチング動作を実現できるため、高効率の絶縁型 DC/DC 電力変換アプリケーションで広く使用されています。1 次側スイッチをゼロ電圧スイッチング (ZVS) 条件で動作させ、スイッチング損失を最小化することにより、LLC コンバータは高効率、低電磁干渉 (EMI)、高電力密度を実現できます。これらの特性は、サーバー用電源、通信用電源システム、民生用電子機器、産業用電力変換システムにとって魅力的なものとなっています。

ハーフブリッジ LLC コンバータは実装が簡単で部品点数が少ないことから、中電力アプリケーションで一般的に採用されています。ただし、電力レベルが高くなると、フルブリッジ LLC トポロジは共振タンクの両端に入力バス電圧の全電圧を印加できるため、魅力的な選択肢になります。これにより、電流ストレスと導通損失を低減すると同時に、より高い電力供給能力を実現できます。

UCC25661x ファミリーは、主にハーフブリッジ LLC コンバータ向けの高集積 LLC 共振コントローラです。より大きい出力電力を必要とするアプリケーションでは、UCC25661x の機能を維持しつつ、フルブリッジ電力段を実装することが望ましい場合があります。これは、追加のインターフェイスとゲートドライブ回路を使用して実現することができます。

このアプリケーションノートでは、UCC25661x コントローラを使用したフルブリッジ LLC 共振コンバータの実装について説明します。本文書では、提案する設計の動作原理、ゲートドライブ信号の生成方法、保護機能の実装、設計上の検討事項、実験による検証について論じます。

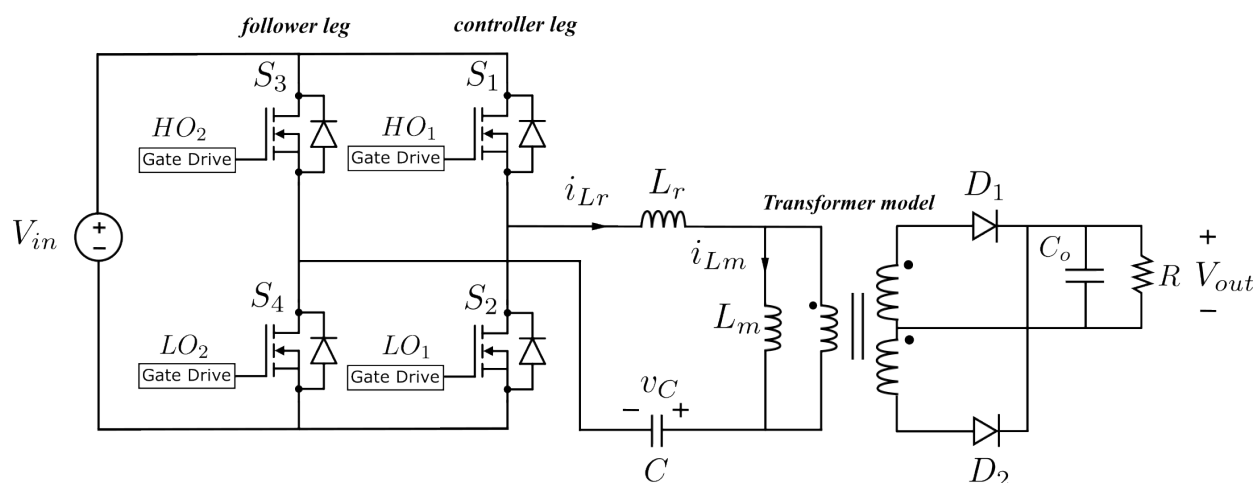


図 1-1. フルブリッジ LLC 共振コンバータ

2 フルブリッジ LLC の動作原理

このセクションでは、フルブリッジ LLC コンバータ動作の概要を説明します。図 2-1 に、2 つのブリッジレグの相補スイッチングシーケンスを示します。定常状態動作中は、対角線上にあるスイッチが同時にオンになり、共振タンクの両端に極性が交互に切り替わる電圧を印加します。この結果、タンク回路に方形波が励起され、共振回路網とトランスを通過する正弦波に近い共振電流が発生します。したがって、AC 電流はスケーリング、整流、フィルタリングされ、安定化された DC 出力電圧が生成されます。

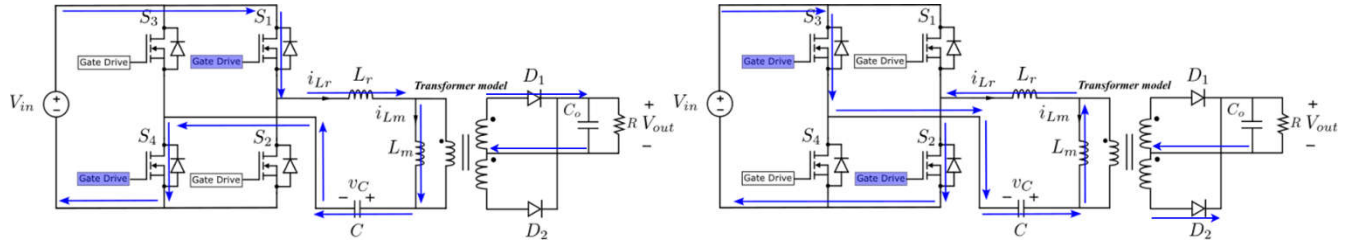


図 2-1. フルブリッジ LLC コンバータのスイッチング状態と共振タンク動作

共振タンクの観点では、フルブリッジ LLC コンバータはハーフブリッジ LLC コンバータと同様に動作します。主な違いは、全入力バス電圧が共振タンクの両端に印加されるのに対して、ハーフブリッジ実装では、バス電圧の半分だけが共振タンクを励起することです。その結果、ゲイン関係とトランスの巻線比の選択には 2 倍の差が生じますが、共振タンク回路解析と周波数制御の方法は変わりません。第 1 高調波近似 (FHA) を使用して求める簡略化された共振タンクゲインの式は、式 1 で求められます (ハーフブリッジトポロジではブリッジが 0.5、フルブリッジトポロジでは 1)。

$$\text{Normalized Gain} = \text{Bridge Gain} \times N(\text{Transformer turns ratio}) \times \text{Impedance Ratio Gain} \quad (1)$$

図 2-3 に、さまざまな負荷条件に対する共振タンクゲイン特性を示します。すべてのゲイン曲線は共振周波数で交差し、各曲線のピークは容量性動作と誘導性動作の境界を定義します。ゼロ電圧スイッチング (ZVS) を確保し、スイッチング損失を最小限に抑えるため、LLC コンバータは誘導性領域で動作するように設計されています。対応する共振タンク波形を図 2-2 に示します ($f_s < f_r$ の場合)。

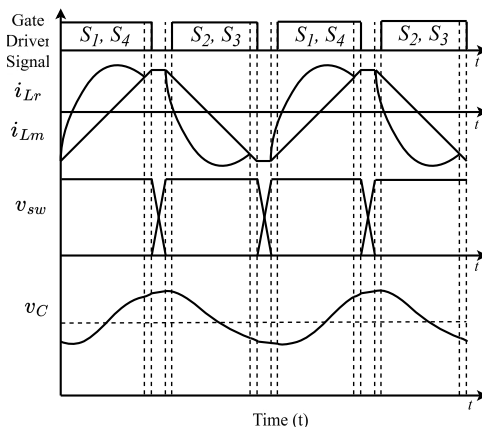


図 2-2. FB-LLC の定常状態における波形

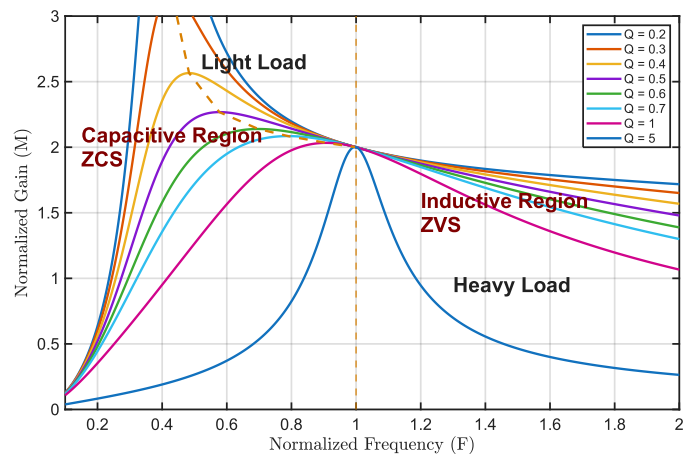


図 2-3. FB-LLC のゲイン特性

3 UCC25661x を使用した実装

3.1 ゲートドライブ アーキテクチャ

UCC25661x は、ハーフブリッジ LLC 動作に必要な HO および LO 信号を生成します。フルブリッジ LLC コンバータでは、各レグのハイサイドスイッチはグランド (PGND) ではなく、それぞれ異なるフローティング スイッチ ノードを基準としています。このため、コントローラ出力をフォロワー レグに直接適用することはできません。絶縁型ゲートドライバを使用することで、各ゲート信号が対応するソース端子に適切に参照されていることを確認し、正しいゲートドライブ電圧を供給できるようにしています。同様のゲートドライバをコントローラ レグで使用することにより、両レグ間での遅延時間を一致できます。ここで、HO1 と LO1 はコントローラ レグ ゲートドライブ信号を、HO2 と LO2 はフォロワー レグ ゲートドライブ信号を示します。HS と HS1 は、それぞれコントローラとフォロワー レグのスイッチング ノード電圧を表します。

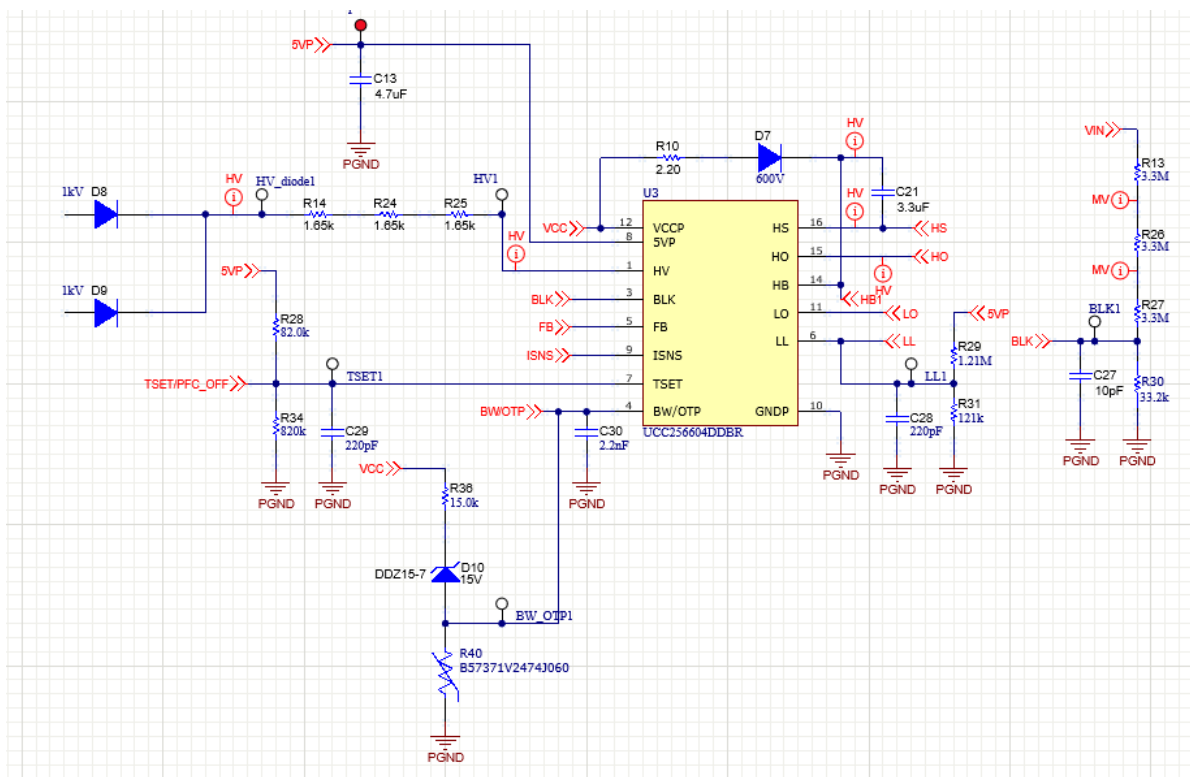


図 3-1. ハーフブリッジ LLC での UCC25661x の実装

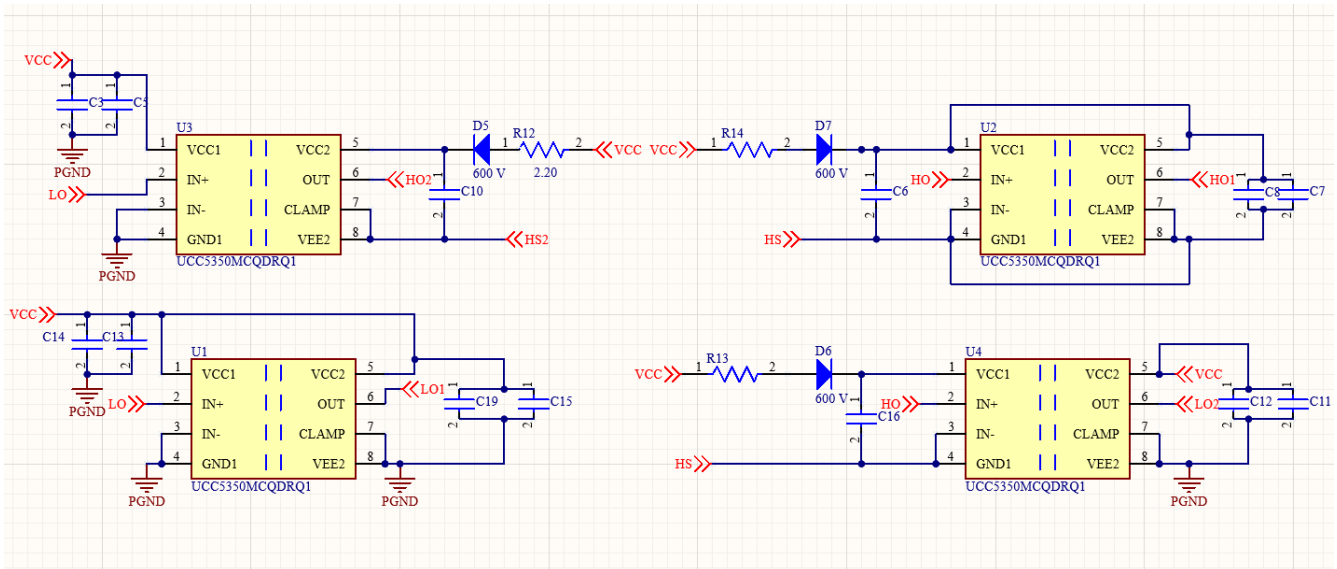


図 3-2. フル ブリッジ LLC 絶縁型ゲートドライバの実装

コントローラ出力の HO および LO は 4 つの絶縁型ゲートドライバを経由して、フル ブリッジ LLC コンバータに必要なゲートドライブ信号 HO1、LO1、HO2、LO2 を生成します。ハイサイド ゲートドライバでは、ブートストラップ回路を使用して、それぞれのスイッチング ノード (HS および HS1) を基準とするフローティング ゲートドライブ電源を供給します。

3.2 ISNS 回路の変更

UCC25661x ハーフ ブリッジ LLC 評価基板では、分割型共振コンデンサ配置と微分回路ベースの回路を使用して、ISNS ピンで共振タンク電流を検出します。フル ブリッジ LLC の実装では、分割型コンデンサ配置は不要で、共振タンクの両端はアクティブにスイッチングするブリッジ ノードに接続されます。その結果、共振コンデンサとタンク回路網には固定基準ノード (PGND) が存在しなくなるため、元の微分回路ベースの検出方法は不適切になります。そのため、微分回路は、電流トランス (CT) を使用した検出方法に置き換えられます。

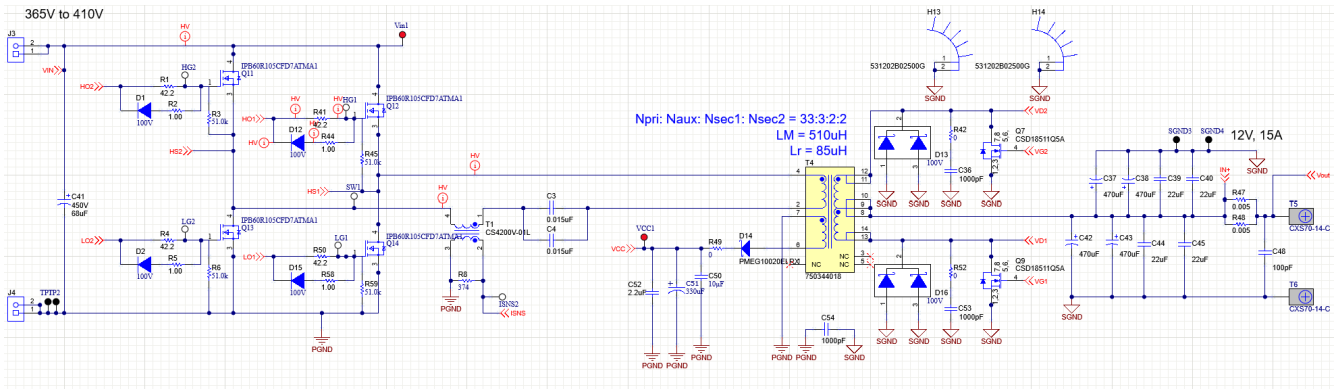


図 3-3. FB LLC 電力段の回路図

ISNS ピンは過電流保護レベル (OCP1) の設定にも使用できます。OCP1 のスレッシュホールド値は、使用している TSET ピンの抵抗とバリエーションに応じて 3.5V または 4V です。この設計では UCC256611 を使用し、OCP1 スレッシュホールド値 (OCP1_Threshold) は 3.5V です。全負荷でのピーク共振電流が既知の場合 (I_{PEAK})、巻数比 N (1 次:2 次) の CT については、負荷抵抗 (R_T) を次のように選択することができます。

$$R_T < OCP1_Threshold \times N / I_{PEAK} \quad (2)$$

OCP1 レベルでのピーク共振電流 (I_{PEAK_OCP1}) は、次式で計算されます。

$$I_PEAK_OCP1 = OCP1_Threshold \times N / RT \quad (3)$$

注

選択する CT は、想定される動作範囲全体にわたって、十分な電流定格とボルト秒能力を満たすものを選ぶ必要があります。

3.3 補助ロジックの実装

起動中、コントローラは最初に 200μs の LO1 パルス印加して、ハイサイド スイッチのブートストラップ コンデンサを充電します。ただし、ブートストラップの充電に絶縁型電源モジュールを使用する場合、コンバータは直ちに通常のフル ブリッジ動作に移行し、LO1 と同時に HO2 がオンになります。その結果、共振タンクに $V_{IN} + V_{CR}$ の電圧が印加されます。この電圧が、共振インダクタまたは漏れインダクタの両端に印加されることで、パワー スイッチの安全な動作限界を超える可能性がある大きなタンク電流が発生します。この状態を回避するため、補助ロジック回路は、起動間隔中に LO2 を LO1 とともに強制的にオンにします。これにより、共振タンクの両端が実質的に負の DC バスに接続されるので、通常のフルブリッジ動作が有効になる前に、共振コンデンサを安全な電流制限内で放電できます。

コントローラの HO および LO 出力は、デジタル ロジック回路との互換性を確保するために、まず 5V ロジックレベル (LO2_5V および LO_5V と表記) に変換されます。LLC 起動シーケンス中、コントローラが 200μs の LO1 起動パルスを生成する前に、TSET 信号は Low に遷移します。フォルト再試行中にも同じシーケンスが繰り返され、1 秒のアイドル期間の後、TSET が再度 Low に遷移します。この立ち下がりエッジをワンショット回路を使用して検出し、SR ラッチ用の短い SET パルスを生成します。同様に、2 番目のワンショット回路を使用して LO_5V の立ち下がりエッジを検出し、短い RESET パルスを生成します。これらの SET および RESET パルスが SR ラッチを制御し、その出力 Q がコンバータの動作モードを決定します。

ラッチが設定 ($Q = 1$) されると、ロジック回路によってロジックレベル LO2 が High に、HO2 が Low に強制され、事前定義された起動スイッチング状態が確立されます。ラッチは、LO_5V の立ち下がりエッジによって RESET パルスが生成されるまで、この状態を保持します。RESET パルスを受信すると、ラッチはクリアされ ($Q = 0$)、ロジック出力の強制動作が解除されます。その後、LO2 と HO2 は変換されたコントローラ信号に従い、通常のフルブリッジ LLC 動作が可能になります。

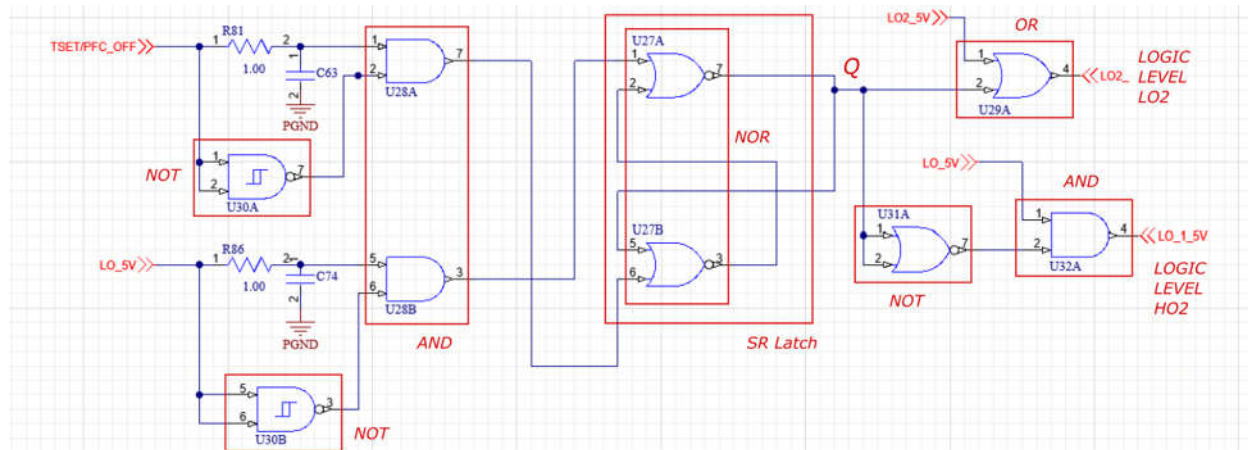


図 3-4. 補助ロジック実装回路図

3.4 ロジックレベル信号変換

1. 補助ロジック回路を実装するには、コントローラからの HO 信号と LO 信号をそれぞれロジックレベル 5V (LO2_5V および LO_5V) に変換する必要があります。

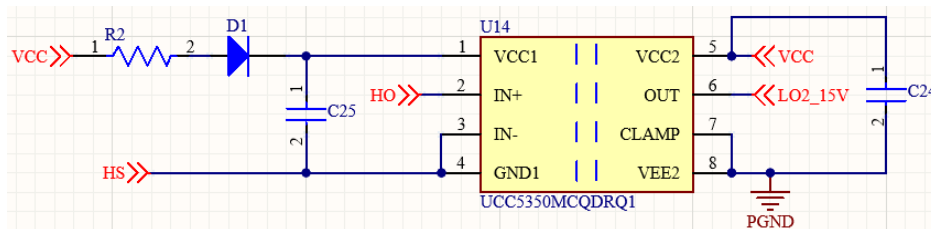


図 3-5. HO コントローラ出力のロジックレベル変換 — 1

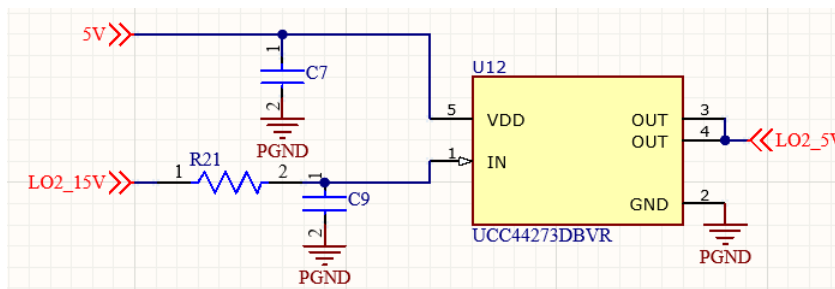


図 3-6. HO コントローラ出力のロジックレベル変換 — 2

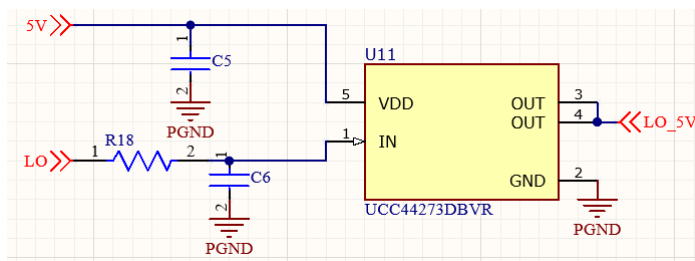


図 3-7. LO コントローラ出力のロジックレベル変換

部品点数を削減した代替の実装例を 図 3-7 に示します。フローティングの HO 信号は ISO1211 絶縁型デジタル入力レシーバを使用して変換し、一方で、LO 信号は抵抗デバイダを使用して変換し、補助ロジック回路で使用可能な 5V 信号を生成します。

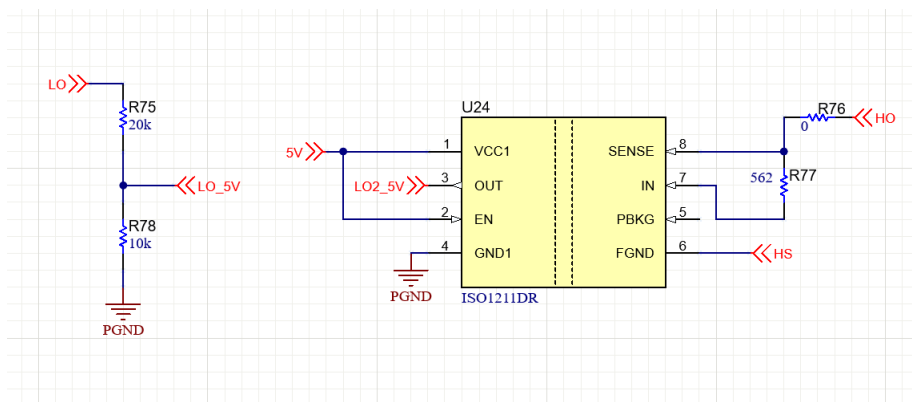


図 3-8. HO および LO コントローラ出力の代替ロジックレベル変換

補助ロジック回路によって生成されたロジックレベル出力 HO2 (LO_1_5V) および LO2 (LO2_5V) は、図 3-8 に示す 4 個の絶縁型ゲートドライバを用いた構成を使用して電力段に接続できます。あるいは、図 3-9 に示すように、ハーフブリッジゲートドライバを使用して同じ機能を実現することもできます。

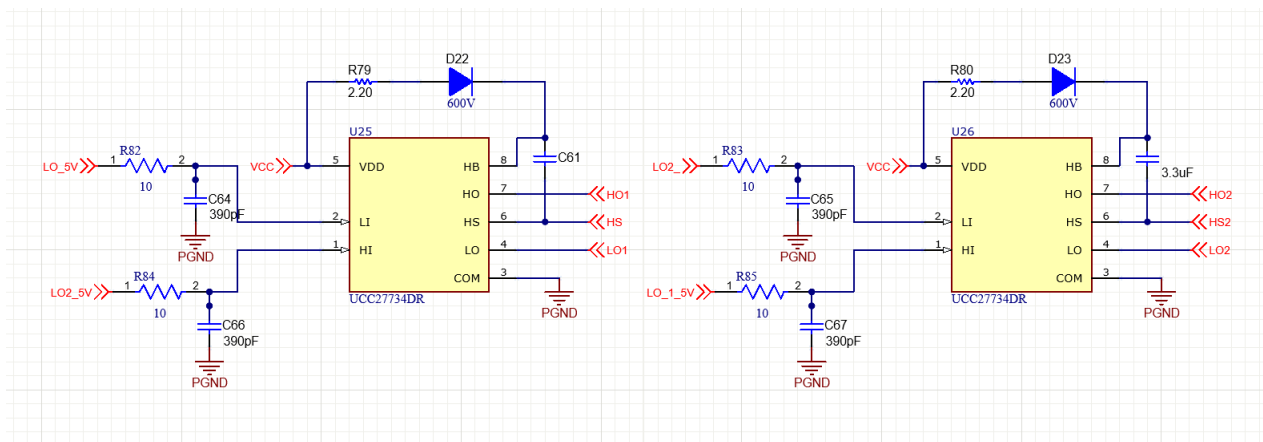


図 3-9. ハーフブリッジ ゲートドライバを使用した代替フルブリッジ LLC ゲートドライバ実装

4 ハードウェア評価結果

通常共振モード動作、バーストモード動作、起動、負荷過渡、バルク電圧低下時におけるフルブリッジ LLC の実験結果を以下に示します。

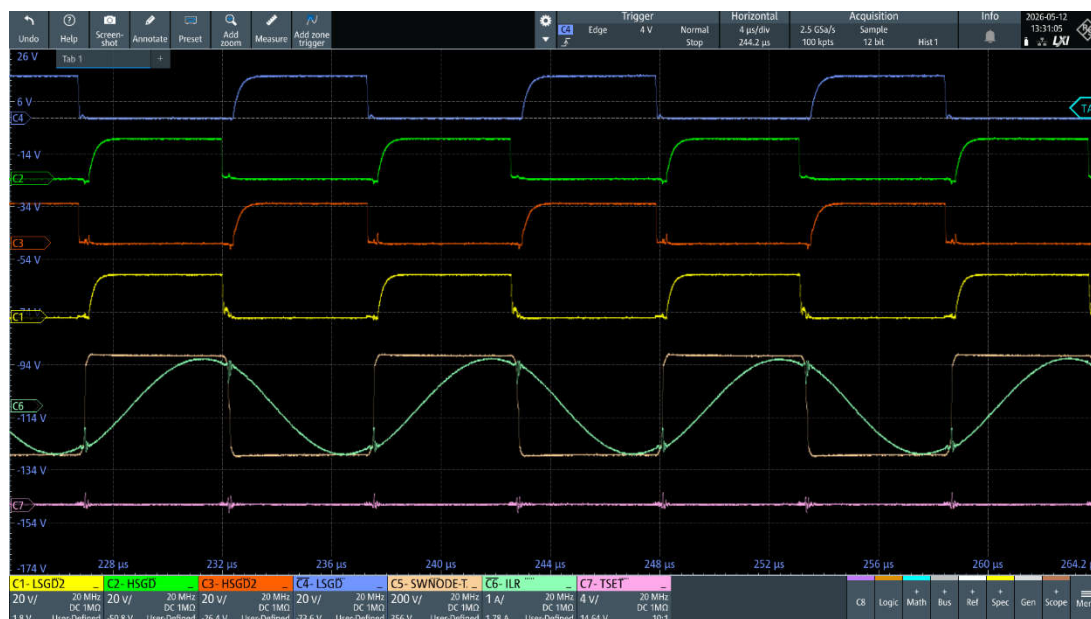


図 4-1. $V_{in} = 185V$ 、 $V_{out} = 12V$ 、 $I_{out} = 7A$ 、通常共振モード動作、C1 = LO2 ゲートドライブ、C2 = HO1 ゲートドライブ、C3 = HO2 ゲートドライブ、C4 = LO1 ゲートドライブ、C5 = タンク電圧、C6 = タンク電流、C7 = TSET ピン電圧

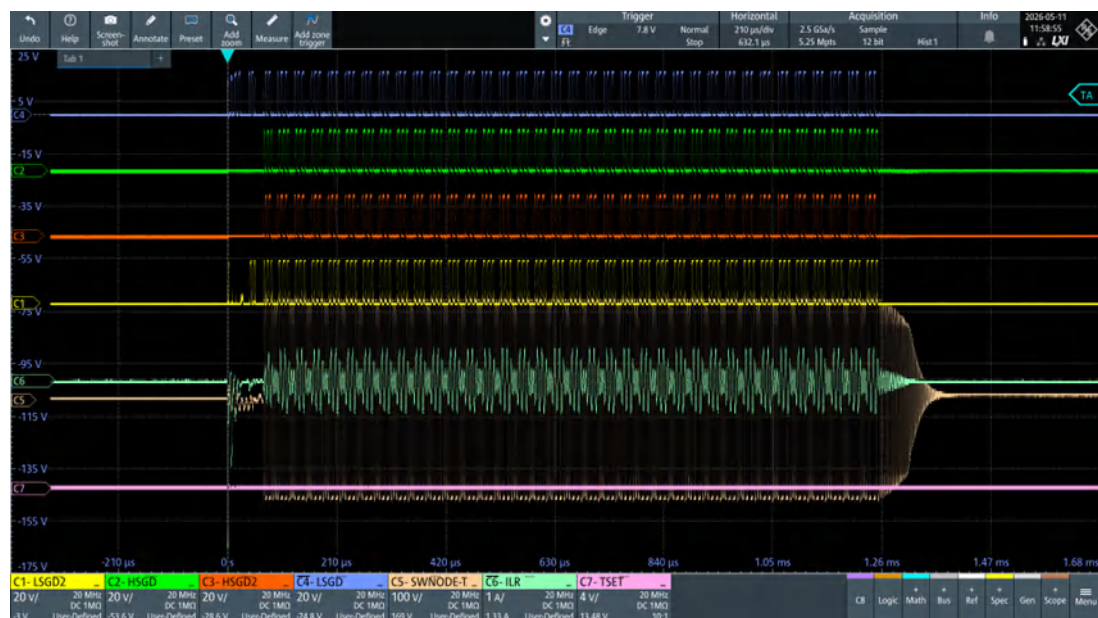


図 4-2. $V_{in} = 185V$ 、 $V_{out} = 12V$ 、無負荷、バーストモード動作、C1 = LO2 ゲートドライブ、C2 = HO1 ゲートドライブ、C3 = HO2 ゲートドライブ、C4 = LO1 ゲートドライブ、C5 = タンク電圧、C6 = タンク電流、C7 = TSET ピン電圧



図 4-3. 起動時の補助ロジック – HO2 と LO2 を 200 μ s パルスの間オン、C1 = LO2 ゲートドライブ、C2 = HO1 ゲートドライブ、C3 = HO2 ゲートドライブ、C4 = LO1 ゲートドライブ、C5 = タンク電圧、C6 = タンク電流、C7 = TSET ピン電圧

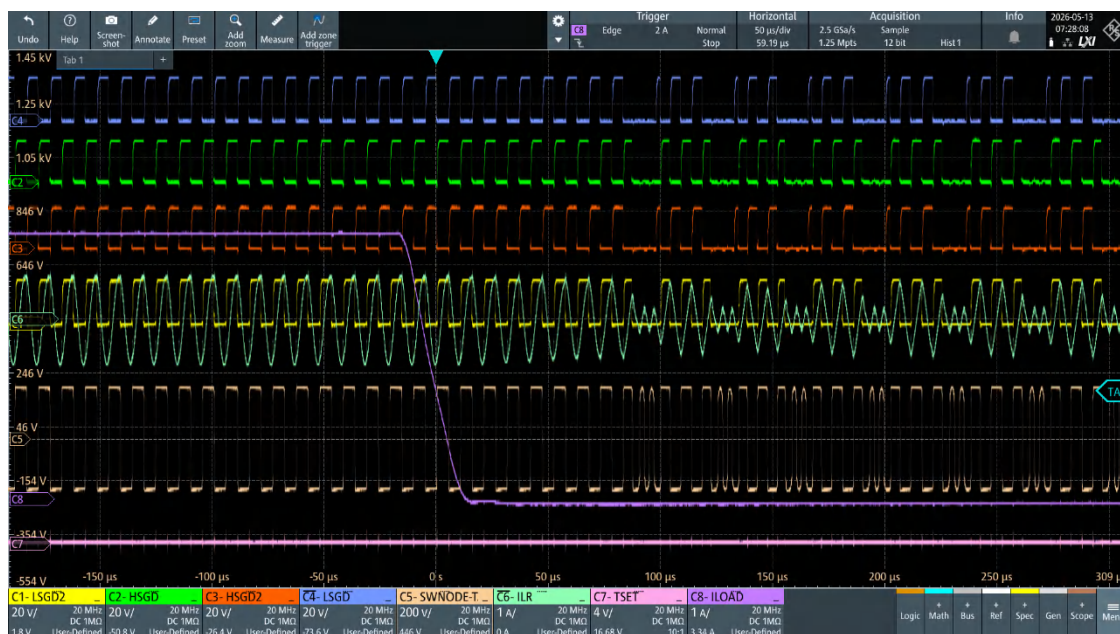


図 4-4. $V_{in} = 185V$, $V_{out} = 12V$, $I_{out} = 5A$ から $0.01A$ 、負荷過渡 ($0.2A/\mu s$)、C1 = LO2 ゲートドライブ、C2 = HO1 ゲートドライブ、C3 = HO2 ゲートドライブ、C4 = LO1 ゲートドライブ、C5 = タンク電圧、C6 = タンク電流、C7 = TSET ピン電圧、C8 = 負荷電流

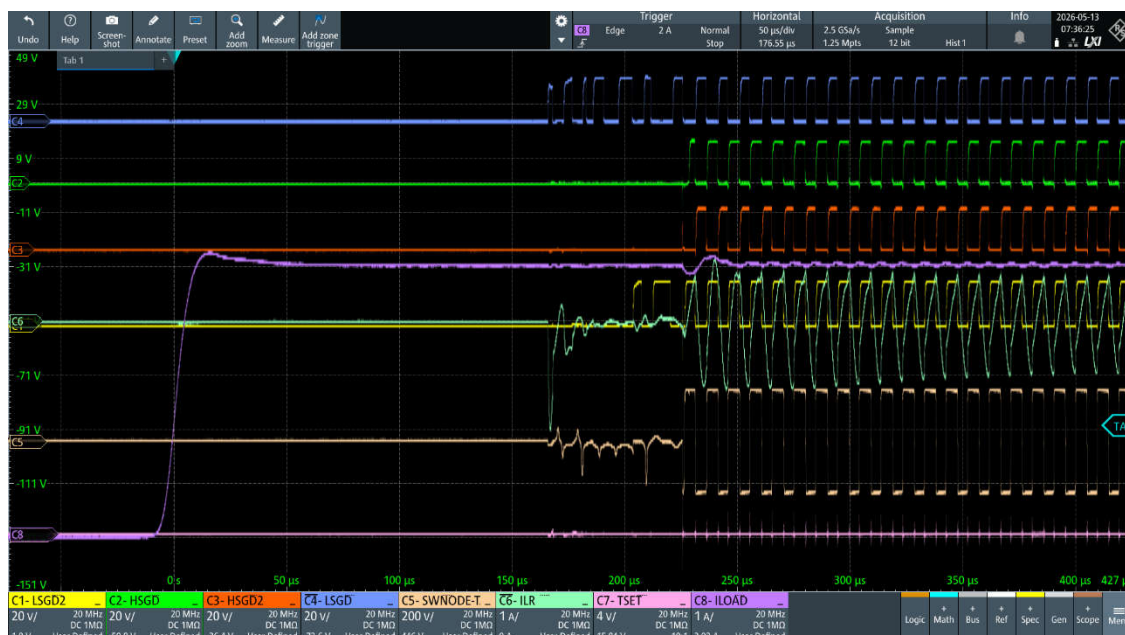


図 4-5. $V_{in} = 185V$, $V_{out} = 12V$, $I_{out} = 0.01A$ から $5A$ 、負荷過渡 ($0.2A/\mu s$)、C1 = LO2 ゲートドライブ、C2 = HO1 ゲートドライブ、C3 = HO2 ゲートドライブ、C4 = LO1 ゲートドライブ、C5 = タンク電圧、C6 = タンク電流、C7 = TSET ピン電圧、C8 = 負荷電流



図 4-6. $V_{in} = 100V$ 、無負荷時に模擬された BLK ブラウンアウトにおける補助ロジック動作、C1 = LO2 ゲートドライブ、C2 = HO1 ゲートドライブ、C3 = HO2 ゲートドライブ、C4 = LO1 ゲートドライブ、C5 = タンク電圧、C6 = タンク電流、C7 = TSET ピン電圧、C8 = バルクピン電圧

すべての実験結果は、補助起動回路を有効にした (セクション 3 に記述)、フルブリッジ構成の改造版 UCC25661x 評価基板上で得られたものです。フルブリッジ LLC では、ハーフブリッジ LLC のタンク電圧の 2 倍が印加されるため、プロトタイプは改造前の評価基板の磁気素子を使用して、 $185VDC$ でテストしました。

5 まとめ

このアプリケーション ノートでは、UCC25661x ハーフ ブリッジ LLC コントローラを使用したフル ブリッジ LLC コンバータの実装について説明します。絶縁型ゲートドライブの実装、補助起動ロジック、電流トランスを使用した共振電流検出を含め、必要とされるハードウェアの変更点を紹介します。改造版 UCC25661x 評価基板の実験結果により、提案された実装の妥当性が検証され、信頼性の高いフル ブリッジ LLC 動作が実証されました。

6 参考資料

1. テキサス インスツルメンツ、『[UCC25661x ファミリ:軽負荷時の効率が最適化され、VIN/VOUT 範囲が広い 750kHz LLC コントローラ](#)』、データシート。
2. テキサス・インスツルメンツ、『[UCC25661x ハーフ ブリッジ LLC 評価基板](#)』評価基板ユーザー ガイド。

7 改訂履歴

Changes from Revision * (September 2026) to Revision A (October 2026)	Page
• 図 1-1 を「マスタ レッグ」の代わりに「コントローラ レッグ」という用語を使用するように更新.....	2
• 「ゲートドライブ アーキテクチャ」サブセクションを作成.....	4
• コンテンツを「UCC25661x を使用した実装」セクションから「ゲートドライブ アーキテクチャ」サブセクションに移動....	4
• 「マスタ」という用語の出現をすべて「コントローラ」に置き換え.....	4
• 「ISNS 回路の変更」サブセクションを作成.....	5
• コンテンツを「UCC25661x を使用した実装」セクションから「ISNS 回路の変更」サブセクションに移動.....	5
• 「補助ロジック実装」サブセクションを作成.....	6
• コンテンツを「UCC25661x を使用した実装」セクションから「補助ロジック実装」サブセクションに移動.....	6
• 図 3-4 を追加.....	6
• 「ロジック レベル信号変換」サブセクションを作成.....	6
• コンテンツを「UCC25661x を使用した実装」セクションから「ロジック レベル信号変換」サブセクションに移動.....	6
• 図 4-1 から 図 4-6 で、重複しているため、 図 4-7 から 図 7-12 を削除.....	9

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みいかなる保証も、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、TI は一切の責任を拒否します。

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 © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月