

Technical Article

デジタルコントローラを用いた 2 次側での LLC 電流モード制御の実装



Desheng Guo

電流モード制御 LLC に関する検討事項

図 1 に示すインダクタ・インダクタ コンデンサ (LLC) 直列共振回路は、1 次側でのゼロ電圧スイッチングと 2 次側でのゼロ電流スイッチングの両立を実現し、効率向上および高いスイッチング周波数の実現を可能にします。一般に、LLC コンバータは直接周波数制御を用いており、これは 1 つの電圧ループのみを持ち、スイッチング周波数を調整することで出力電圧を安定化させます。直接周波数制御を用いた LLC は、負荷条件によって変動する二重極を持つ LLC の小信号伝達関数のため、高い帯域幅を達成できません [1] [2]。すべてのコーナー条件を考慮すると、直接周波数制御 LLC の補償器設計は複雑かつ困難になります。

電流モード制御は内側制御ループにより二重極を除去し、シンプルな補償器であらゆる動作条件下で高帯域幅を実現します。ハイブリッド ヒステリシス制御は、チャージ制御とランプ補償を組み合わせた LLC 電流モード制御の手法です [3]。この手法はチャージ制御の優れた過渡応答性能を維持しつつ、スロープ補償を加えることで無負荷または軽負荷時の安定性問題を回避します。テキサス・インスツルメンツの UCC256404 LLC 共振コントローラは、この手法の有効性を実証しています。

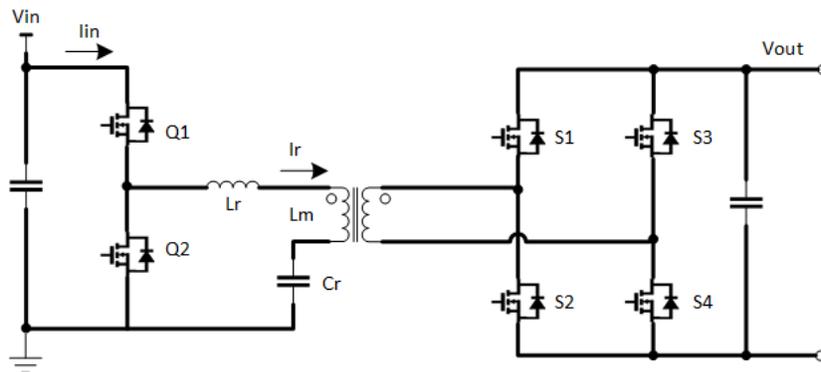


図 1. 1 次側でのゼロ電圧スイッチングと 2 次側でのゼロ電流スイッチングの両立を実現する LLC 直列共振回路。出典:テキサス・インスツルメンツ

LLC 電流モード制御の原理

バックおよびブーストなどのパルス幅変調 (PWM) コンバータと同様に、ピーク電流モード制御は各スイッチングサイクルでインダクタ電流を制御し、内側制御ループを一次系に簡略化します。参考文献 [2] では、共振コンデンサ電圧を用いた LLC チャージ制御が提案されています。

LLC コンバータにおいて、共振タンクは振り子のように動作します。ハイサイド スイッチとローサイド スイッチは共振コンデンサの電圧を押し引きしており、ハイサイド スイッチをオンにすると共振電流が正に転じた後に共振コンデンサの電圧が上昇し、逆にローサイド スイッチをオンにすると共振電流が負に転じた後に共振コンデンサの電圧が下降します。

ハイサイド スイッチをオンにすると、エネルギーが共振コンバータに流れ込みます。入力デカップリング コンデンサを取り除くと、共振タンクに供給される電力は入力電圧と入力電流の積の積分に等しくなります。デッド タイムを無視すると、式 1 は各スイッチング サイクルにおけるエネルギーを表します。

$$E_{pos} = \int V_{in} \times i_{in}(t) dt \quad (1)$$

式 1 において、入力電圧は一定であり、入力電流は共振電流の絶対値に等しくなります。したがって、式 1 は式 2 に修正できます。

$$E_{pos} = V_{in} \times \int |i_r(t)| dt \quad (2)$$

共振コンデンサに注目すると、共振電流の積分は共振コンデンサの電圧変動に比例します (式 3)。

$$\int i_r(t) dt = C_{CR} \times \Delta V_{CR} \quad (3)$$

式 4 は共振タンクに供給されるエネルギーを導出しています。

$$E_{pos} = V_{in} \times C_{CR} \times \Delta V_{CR} \quad (4)$$

式 4 から、ハイサイド スイッチがオンしたときの共振コンデンサの電圧変動に比例して、1 サイクルあたりの供給エネルギーが決まることが明らかです。これは、エネルギーがインダクタのピーク電流に比例するバックまたはブースト コンバータのピーク電流制御に非常によく似ています。

LLC 電流モード制御は、[図 2](#) に示すように、共振コンデンサの電圧変動を制御することで各スイッチング サイクルに供給されるエネルギーを制御します。

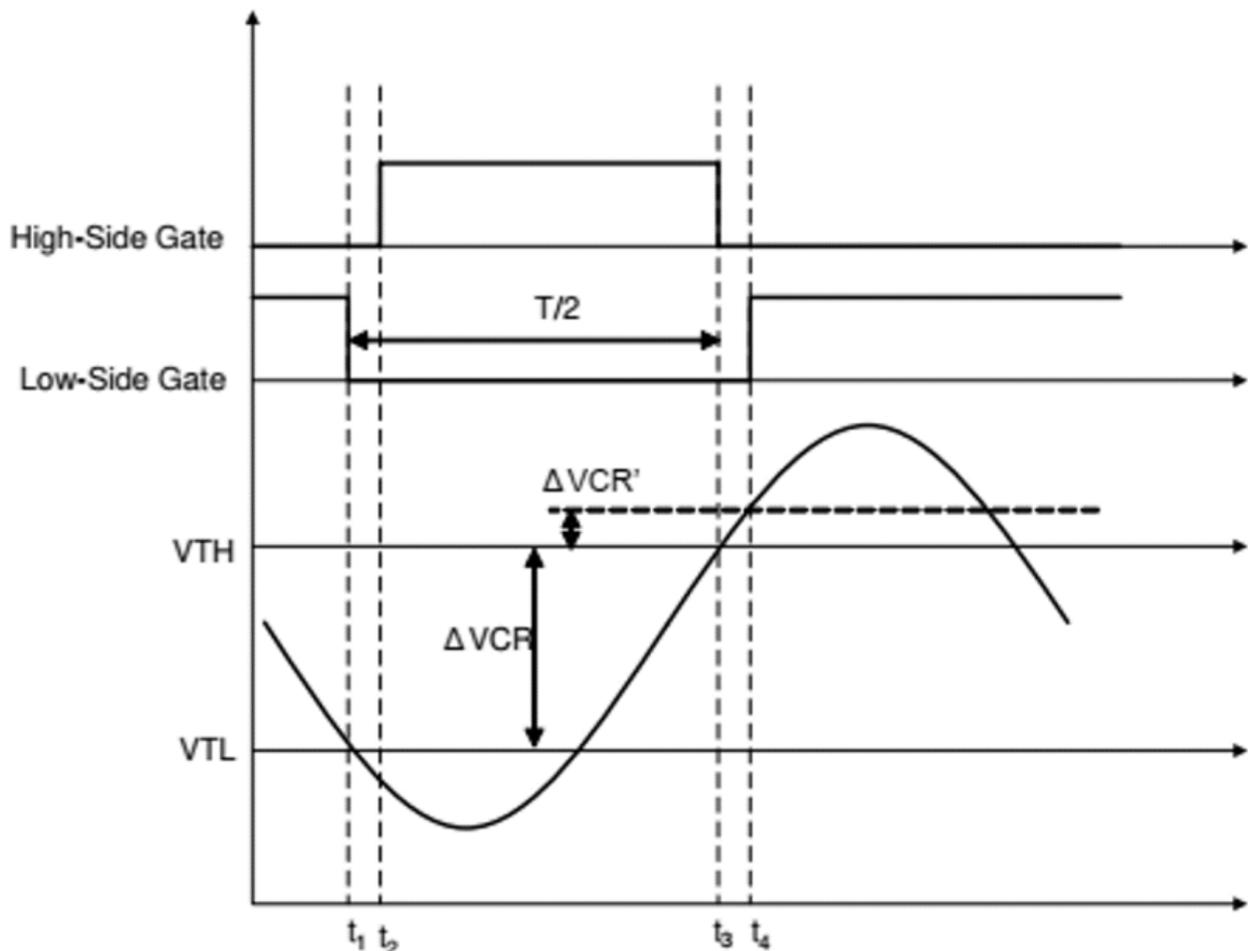


図 2. 共振コンデンサの電圧変動を制御することで各スイッチング サイクルに供給されるエネルギーを管理する LLC 電流モード制御の原理。出典：テキサス・インスツルメンツ

MCU を用いた LLC 電流モード制御

図 3 は、テキサス・インスツルメンツの TMS320F280039C C2000™ 32 ビット マイクロコントローラ (MCU) を用いて実装した電流モード LLC のロジックを示しており、共振コンデンサのデルタ電圧 (ΔV_{CR}) のハードウェア比較、パルス生成、および最大周期制限が含まれています [4]。

LLC 電流モード制御において、信号 V_c は電圧ループ補償器から出力され、信号 V_{CR} は共振コンデンサの電圧検出信号です。C2000 のコンパレータ サブシステム モジュールには内部ランプ発生器が搭載されており、 V_c に対して自動的に下り坂補償を提供できます。ランプ発生器の初期値を設定するだけで、デジタル・アナログ コンバータ (DAC) がスロープ設定に基づき下り坂の V_{CR} 制限値 (V_{c_ramp}) を供給します。コンパレータ サブシステム モジュールは、 V_{CR} のアナログ信号とスロープ制限値を比較し、トリガー イベント (COMPARE_EVT) を生成して、ePWM X バーを介して強化型 PWM (ePWM) を駆動します。

ePWM のアクションクオリファイア サブモジュールは、コンパレータ サブシステムからの比較イベントを受け取り、各スイッチング サイクルで PWM のハイサイド (PWMH) をローに引き下げます。その後、コンフィギュラブル ロジックブロックが PWMH がローになった後、同じパルス幅を PWM のローサイド (PWML) に複製します。PWML がローになった後、コンフィギュラブル ロジックブロックは同期パルスを生成して関連するすべてのモジュールをリセットし、PWMH をハイにリセットします。このプロセスは新しいスイッチング サイクルとともに繰り返されます。

比較動作に加えて、タイム ベース サブモジュールは PWMH と PWML の最大パルス幅を制限し、これが LLC コンバータの最小スイッチング周波数を決定します。比較イベントがタイマーが最大設定値に達するまで発生しない場合、タイム ベース サブモジュールはアクションクオリファイア (AQ) サブモジュールをリセットし、PWMH をプルダウンして、コンパレータ サブシステム モジュールからの比較イベント動作に代わる制御を行います。

このハードウェア ロジックは内側の V_{CR} 変動制御を構成し、各スイッチング サイクルに共振タンクへ供給されるエネルギーを制御します。その後、従来の割り込みサービスルーチンを用いて、 V_{CR} 変動振幅の設定値を V_c に計算・更新する外側の電圧ループ補償器を設計できます。

ハイブリッド ヒステリシス制御ロジックの詳細な説明については、参考文献 [1] をご参照ください。

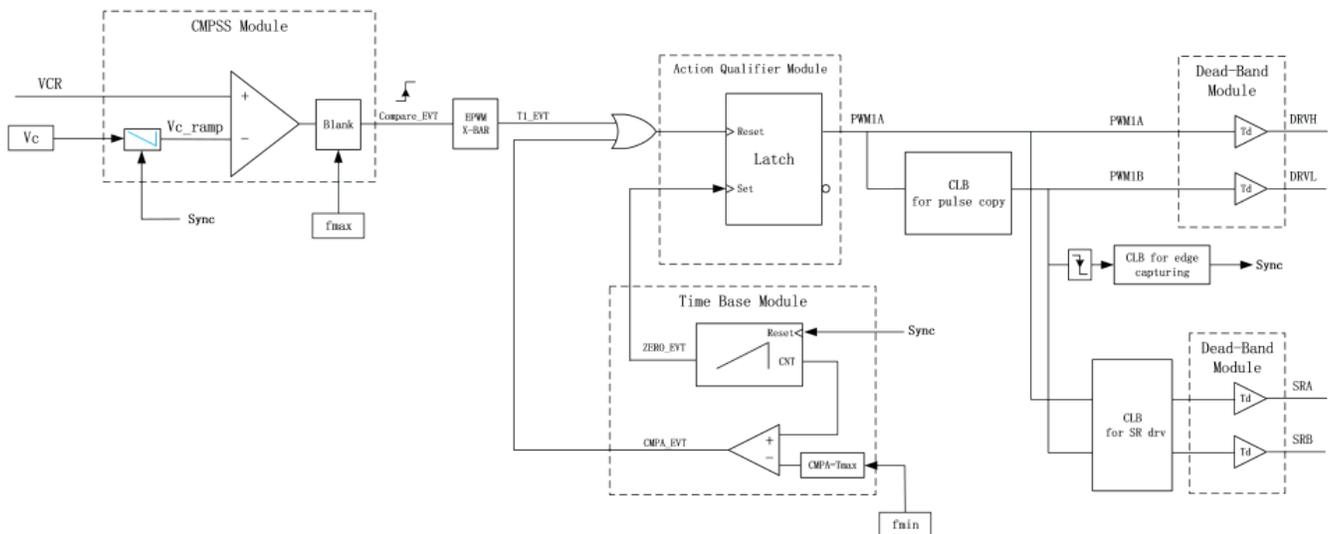


図 3. 信号 V_c が電圧ループ補償器から出力され、信号 V_{CR} が共振コンデンサの電圧検出信号である、C2000 MCU を用いた LLC 電流モード制御ロジック。出典:テキサス・インスツルメンツ

実験結果

ここで説明した電流モード制御手法を、TMS320F280039C MCU 搭載の 1kW ハーフブリッジ LLC プラットフォームで検証しました。図 4 は、400V 入力および 42A 負荷下での電圧ループのボード線図を示しており、LLC が 50 度の位相余裕で 6kHz の帯域幅を達成できることを実証しています。

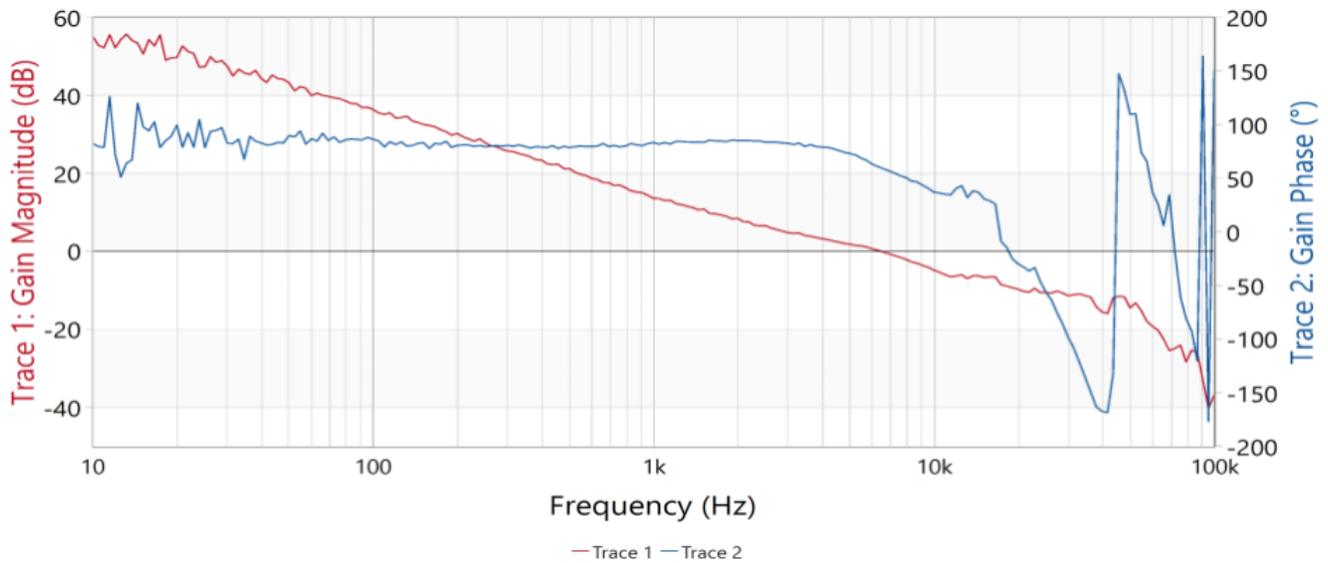
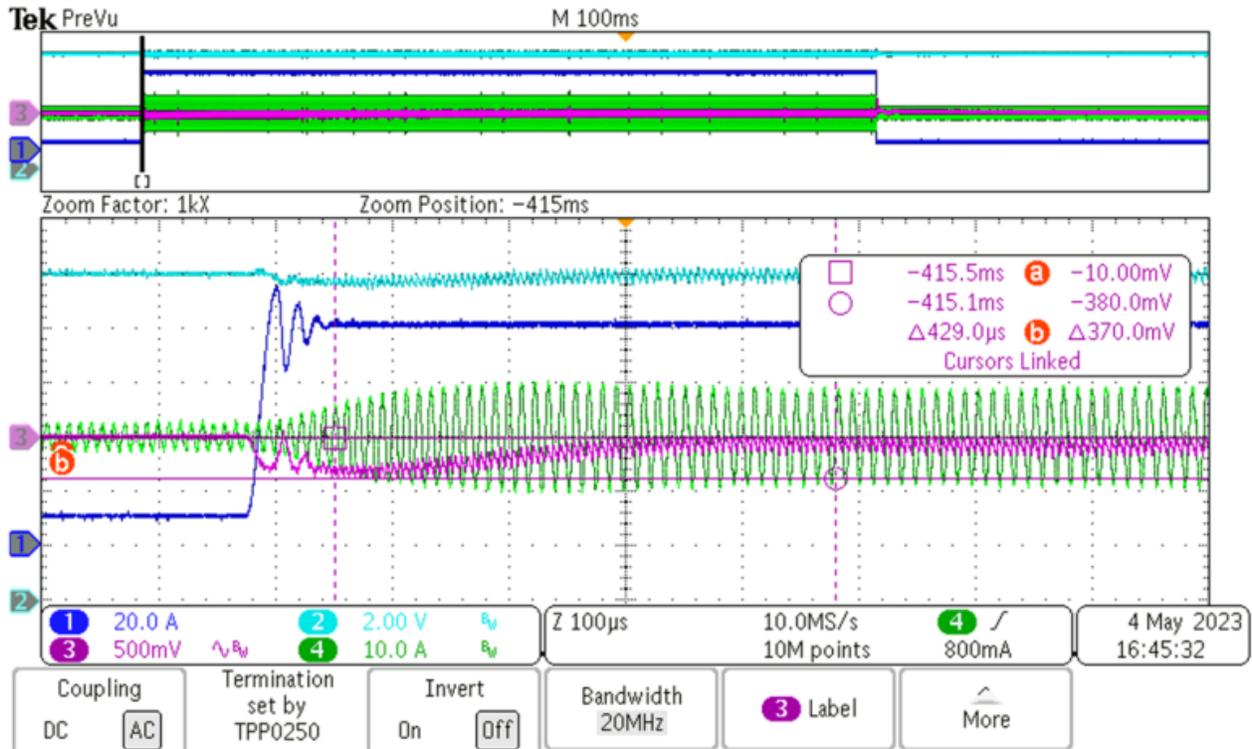


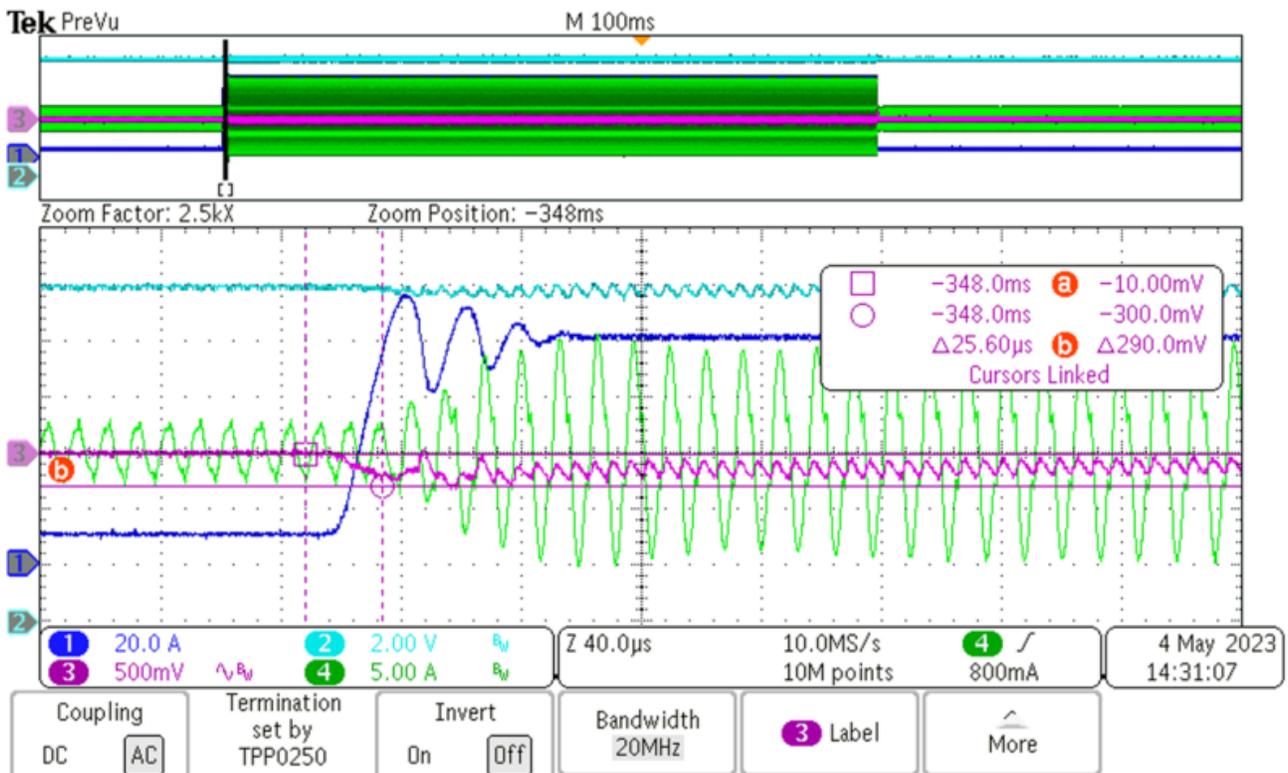
図 4. 400V 入力および 42A 負荷下における電流モード制御 LLC のボード線図。出典: テキサス・インスツルメンツ

図 5 は、400V 入力および $2.5\text{A}/\mu\text{s}$ のスルーレートで 10A から 80A への負荷過渡応答において、直接周波数制御とハイブリッドヒステリシス制御の負荷過渡性能を比較しています。ご覧のとおり、ハイブリッドヒステリシス制御の電流モード制御手法は、従来の直接周波数制御 LLC よりも優れた負荷過渡応答を実現します。

さらなる実験データおよび波形については、参考文献 [5] をご参照ください。



(a)



(b)

図 5. 直接周波数制御 (a) およびハイブリッドヒステリシス制御 (b) による $400V_{DC}$ 入力下、 $2.5A/\mu s$ のスルーレートで $10A$ から $80A$ への負荷過渡応答。緑色は 1 次電流、水色は直流結合の出力電圧、紫色は交流結合の出力電圧、紺色は出力電流を示します。出典: テキサス・インスツルメンツ

デジタル電流モード制御 LLC

デジタル電流モード制御 LLC は、直接周波数制御よりも高い制御帯域幅を実現し、負荷遷移時の電圧変動を極めて低く抑えられます。N+1 冗長構成および並列アプリケーションにおいて、この制御手法はホット スワップや保護動作時にもバス電圧をレギュレーション範囲内に維持できます。この高速応答特性とデジタル プログラマブル機能により、この制御手法はデータ センター電源や AI サーバー電源で広く採用されています。

関連コンテンツ

- [Power Tips #84:『LLC 直列共振コンバータの既成概念にとらわれない考え方』](#)
- [Power Tips #117:フル動作条件でのテストに先立つ、LLC 共振タンクの測定](#)
- [Power Tips #122:1kW 高密度 LLC 電源モジュールに使用される平面トランスの概要](#)
- [Power Tips #97:『バッテリー チャージャのニーズに合わせて LLC-SRC のゲイン曲線を形成する』](#)
- [Power Tips #92:『高周波共振コンバータ設計上の考慮事項、パート 2』](#)

参考資料

1. Hu, Zhiyuan, Yan-Fei Liu, Paresh C. Sen 著。「[Bang-Bang チャージ制御による LLC 共振コンバータ](#)。」IEEE Transactions on Power Electronics 30, no. 2 (2015 年 2 月):pp. 1093 ~ 1108. doi:10.1109/TPEL.2014.2313130。
2. McDonald, Brent, Yalong Li 著。「[業界最高クラスの過渡応答性能と低スタンバイ電力消費を実現する新型 LLC 共振コントローラ](#)。」2018 年 3 月 4~8 日、テキサス州サンアントニオ開催の IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) にて発表 (2018 年)、pp. 489-493. doi:10.1109/APEC.2018.8341056。
3. 「[UCC25640x 超低可聴ノイズ、超低スタンバイ電力の LLC 共振コントローラ](#)。」テキサス・インスツルメンツ データシート、資料番号 SLUSD90E、2021 年 2 月。
4. Li, Aki, Desheng Guo, Peter Luong, Chen Jiang 著。「[ハイブリッド ヒステリシス制御 LLC コンバータのデジタル制御実装](#)。」テキサス・インスツルメンツ アプリケーション ノート、資料番号 SPRADJ1A、2024 年 8 月。
5. テキサス・インスツルメンツ (発行年記載なし)「[C2000™ リアルタイム マイコン使用、1kW、12V、HHC \(ハイブリッド ヒステリシス制御\) LLC \(インダクタ・インダクタ コンデンサ\) のリファレンス デザイン](#)。」テキサス・インスツルメンツのリファレンス デザイン No. PMP41081。アクセス日:2025 年 1 月 16 日。

この記事は、以前 EDN.com で公開された記事です。

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、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