

Technical Article

LLC 共振コンバータを使用して広い動作範囲を実現するためのヒントとコツ



Benjamin Lough

インダクタ-インダクタ-コンデンサ (LLC) 共振コンバータは、絶縁型 DC/DC コンバータを必要とするアプリケーションに適した、いくつかの魅力的な特性を持っています。たとえば、スイッチング損失の最小化、共振周波数を下回る動作時の逆回復が発生しない、トランス内での大きな漏れインダクタンスに耐えられる能力などです。

課題

広い動作範囲で LLC コンバータを設計するときの主な課題は、等価負荷抵抗に対するゲイン曲線の動作です。これは、品質係数 (Q_e) が増加すると逆に最大実現可能ゲインが低下し、 Q_e が減少するにつれて最小達成可能ゲインが増加するためです。これを、以下の図 1 に示します。

$$Q_e = \frac{\sqrt{L_r C_r}}{R_e} \quad (1)$$

$$L_n = \frac{L_m}{L_r} \quad (2)$$

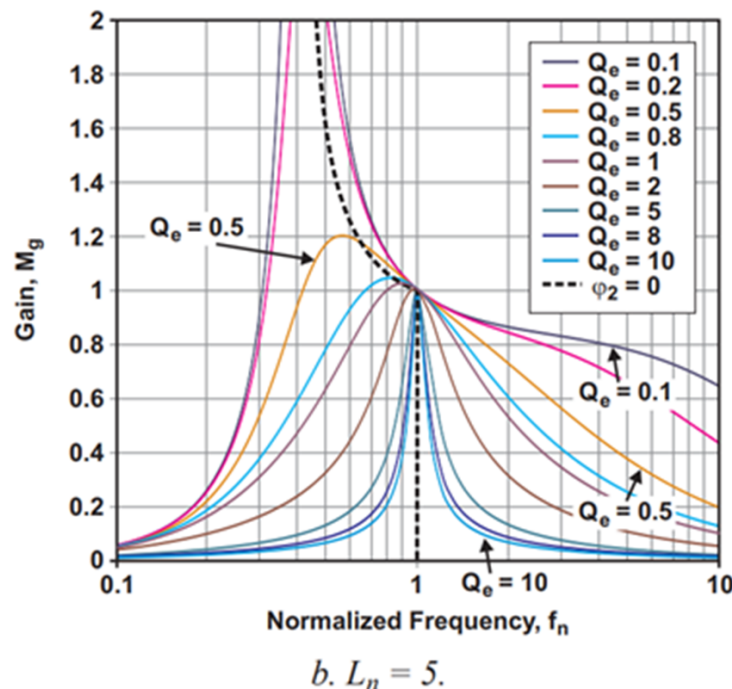


図 1. Q_e が大きくなると最大実現可能ゲインが低下することを示す LLC ゲイン曲線。出典: テキサス・インスツルメンツ

この挙動により、電力段や、妥当なスイッチング周波数範囲で適切な 2 乗平均平方根 (RMS) 電流を維持するのは困難です。必要な周波数範囲を狭くするには、インダクタンス比 (L_n) を小さくする必要がありますが、インダクタンス比が小さい

ほど、電力段の磁化電流が大きくなります。この記事では、広い動作範囲の LLC コンバータを設計するための 5 つのヒントについてご説明します。

再構成可能な整流器の使用

LLC コンバータの動作範囲を拡大する潜在的な方法の 1 つは、図 2 に示すように、再構成可能な整流器を実装することです。

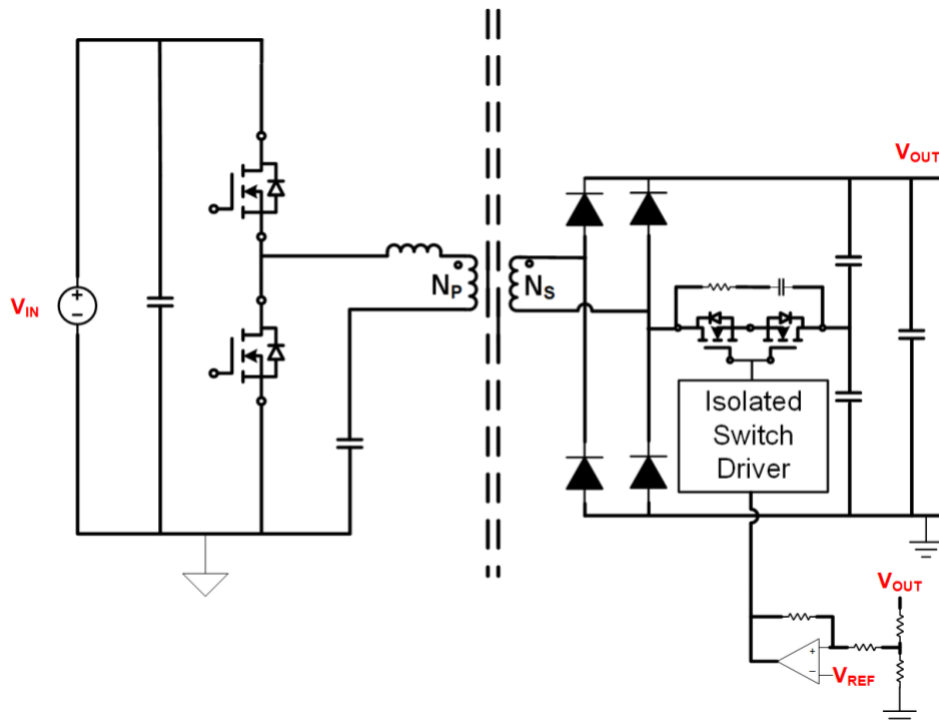


図 2. 再構成可能な整流器を搭載した LLC コンバータを示します。これは、フルブリッジまたは電圧増倍機能として再構成可能です。出典: テキサス・インスツルメンツ

この構造では、コンパレータを使用して出力電圧を調べて動作モードを決定することにより、整流器をフルブリッジまたは電圧増倍整流器として構成できます。フルブリッジ整流器として動作している場合、式 3 で入力から出力への伝達関数が計算されます。

$$V_{out} = M_g(f_{sw}) \times \frac{1}{n} \times \frac{V_{in}}{2} \quad (3)$$

電圧増倍整流器として動作している場合、入力から出力への伝達関数は次のようになります。

$$V_{out} = 2 \times M_g(f_{sw}) \times \frac{1}{n} \times \frac{V_{in}}{2} \quad (4)$$

図 3 に、上記のアプローチを使用して、固定の 450V 入力から 140V ~ 420V の出力電圧範囲を実現する LLC のスイッチング周波数と出力電圧の関係を示します。このデータは、出力の 800mA 負荷で収集されます。コンパレータがフルブリッジ モードから電圧増倍機能モードに切り替わる 200V でのジャンプに注意してください。

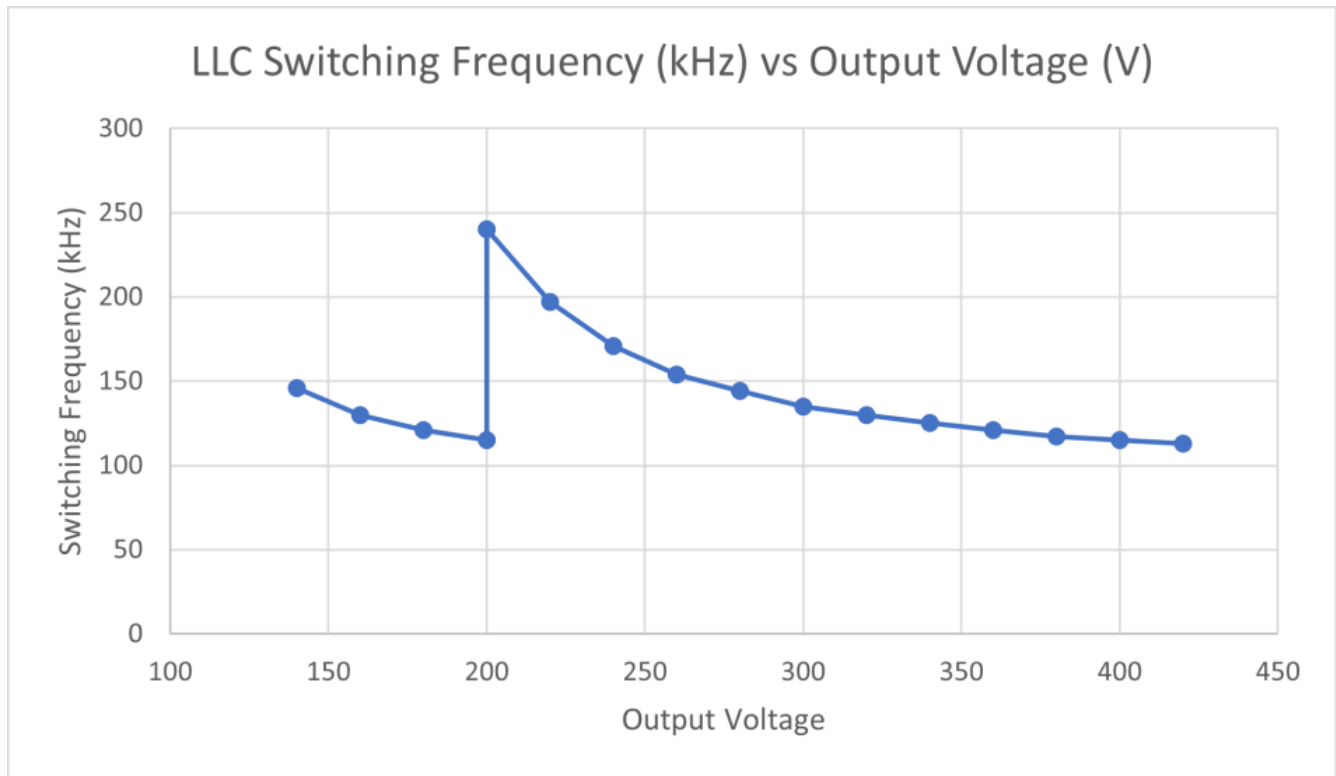


図 3. LED ドライバのリファレンス デザインにおけるスイッチング周波数と出力電圧との関係。出典:テキサス・インスツルメンツ

巻線と整流器の静電容量を最小化

動作ポイントが最小ゲイン曲線を下回ると、LLC コントローラは強制的にバースト モードで動作し、出力電圧をレギュレーション状態に維持します。バースト モードでは、低周波の出力リップル電圧が高くなります。これは、軽負荷かつ最小出力電圧で非常に小さい出力リップルを必要とする用途では問題となります。

この場合、トランス内の巻線容量と、整流器の出力容量 (C_{oss}) または接合部容量 (C_j) を最小限に抑える必要があります。これらの寄生容量により、共振周波数を上回る動作時にゲイン曲線が反転します。図 4 に、軽負荷時の LLC ゲイン曲線と、電力段で使用される整流器の巻線容量と C_{oss} を考慮したときの同じ LLC ゲイン曲線に関する従来の第 1 高調波近似 (FHA) 計算を示します。

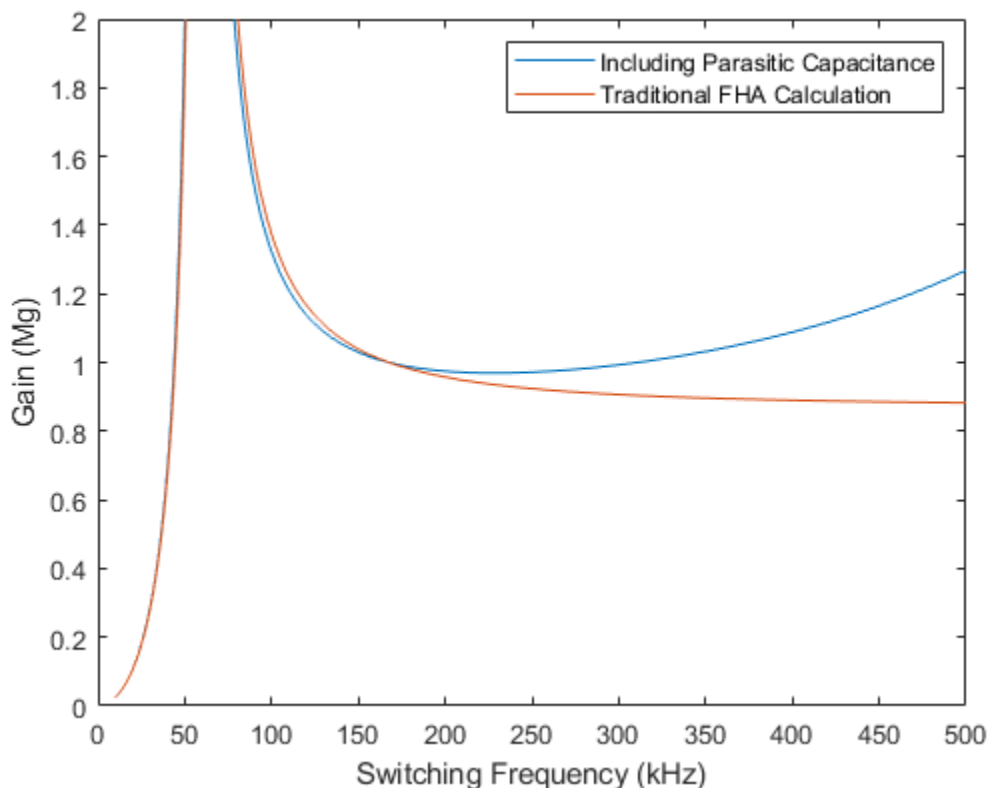


図 4. 軽負荷時の LLC ゲイン曲線に及ぼす寄生容量の影響。出典: テキサス・インスツルメンツ

トランス内の巻線のスタックアップに細心の注意を払い、整流器部品の選択を行うことで、このゲイン曲線の反転効果を最小限に抑えることができます。SIC ダイオードや GaN 高電子移動度トランジスタ (HEMT) のようなワイドバンドギャップデバイスを整流器として使用すると、Si MOSFET やダイオードに比べて C_{oss} を大幅に低くできます。

LLC コントローラの高周波スキップモードでの使用

高周波数のスキップ モードは、通常スイッチングで実現できるゲインよりも低いゲインを実現できます。以下に、70V～450V の入力電圧範囲を持つ 100W ハーフブリッジ LLC コンバータの例を示します。図 5 では、共振電流を緑、1 次側スイッチノードを青で示しています。

右側では、LLC コンバータは高周波数のスキップ モードで動作し、4 番目のスイッチング サイクルごとに省略しています。スイッチング周波数は 260kHz ですが、77kHz のバースト周波数ではサブ変調されます。

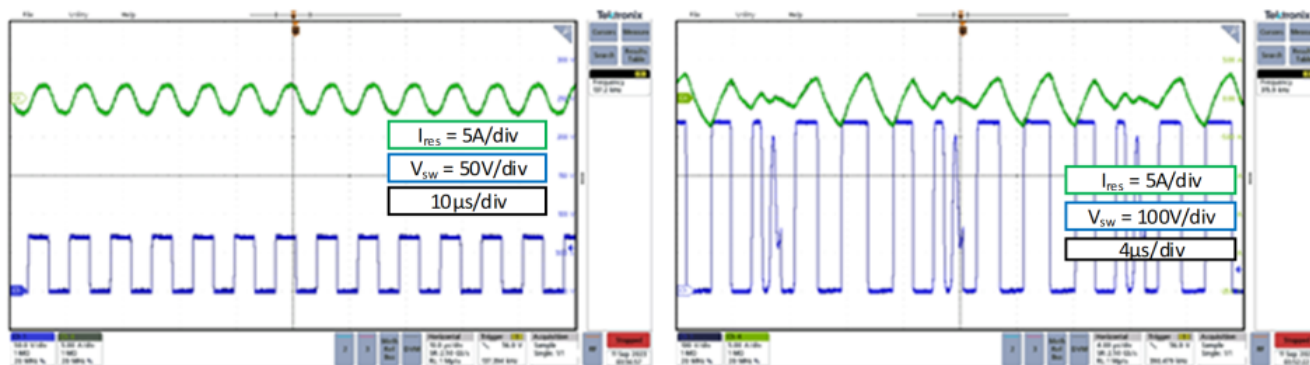


図 5. 70V と 450V の各入力での 100W LLC コンバータのスイッチング動作で、共振電流は緑色、1 次側スイッチノードは青色です。出典: テキサス・インスツルメンツ

補助バイアス電圧の管理

電源の 1 次側と 2 次側に必要なバイアス電圧を生成するには、LLC トランスに補助巻線を含める必要があります。出力電圧が可変 LLC コンバータの場合、出力電圧の変化に伴って補助巻線の電圧が変化します。このことは、補助巻線と 2 次巻線との結合が不十分な断片化したボビンを使用する LLC トランスに特に当てはまります。バイアス電圧を制御するためにシンプルな低ドロップアウトレギュレータ (LDO) 構造を使用する場合、出力電圧が上昇すると効率は低下します。消費電力を処理するために、より大型の物理パッケージが必要になることがあります。

図 6 では、 N_{aux1} と N_{aux2} のサイズが、最小の出力電圧(または VCC バイアス電圧)が D1、Q1、D4 を通して供給されるように設定されています。出力電圧が上昇すると、C2 の電圧はツェナー D3 のブレークダウン電圧から Q1 のゲートソーススレッショルド電圧を引いた値に制限されます。出力電圧がさらに上昇すると、 N_{aux2} によって生成される電圧が VCC を供給できるほど高くなり、ゲートソース間電圧がターンオフスレッショルドを下回ると Q1 が強制的にオフになります。

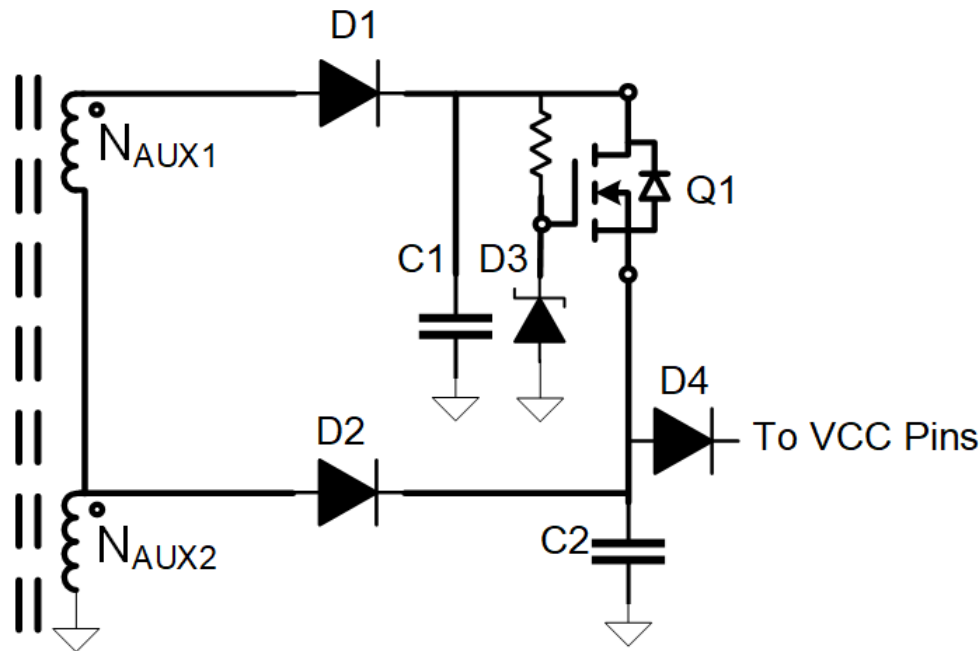


図 6. 補助巻線と LDO 構造を使用して、電源の 1 次側と 2 次側に必要なバイアス電圧を生成します。出典: テキサス・インスツルメンツ

このアプローチは、単一の巻線 + LDO より効率的ですが、2 つの補助巻線が必要になります。補助巻線が 1 つだけを必要とする別の方法は、LDO の代わりに降圧コンバータまたは昇圧コンバータを使用することです。

深放電されたバッテリーのトリクル充電の管理

バッテリーチャージャとして使用する LLC コンバータは、完全な充電電流を安全に取り外せるように、バッテリーパックの電圧が十分に高くなるまで、小さな充電電流を印加することで、深放電したバッテリーを安全に回復する必要があります。LLC は、小さい出力電流で 0V の出力を安定化することはできないため、この要件を満たすのに苦労しています。

これは、図 7 に示すように、並列接続したバイパス FET による小さな定電流回路を含めることで管理できます。トリクル充電モードでは、バイパス FET がオフになり、出力電流をレギュレートするように構成された LM317 から出力電流が供給されます。これにより、出力電圧が 0V の場合でも、LLC コンバータの最小出力電圧が 0V を上回ることができます。この方法により、LLC トランスは 1 次側と 2 次側に必要なバイアス電圧を生成できるため、出力電圧が 0V の場合に個別のバイアス電源を必要としません。バッテリーパックの電圧が十分に高いレベルに上昇すると、ディスクリートチャージポンプ回路を備えた FET が定電流回路をバイパスします。

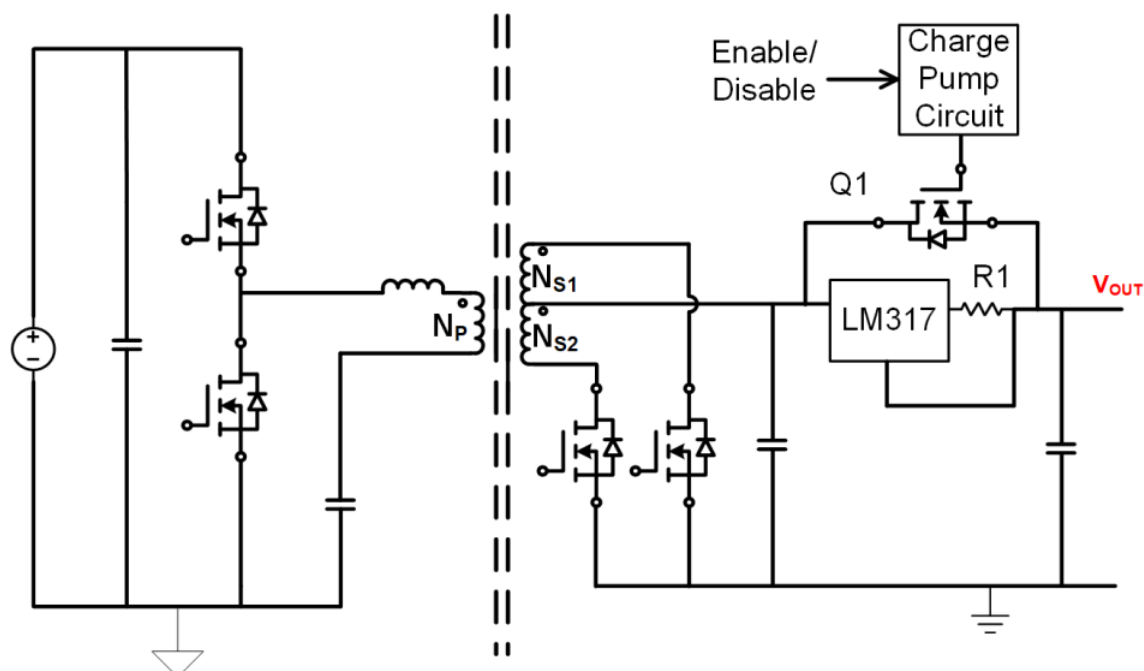


図 7. 深放電したバッテリーを安全に回復できるトリクル充電回路を搭載した LLC。出典: テキサス・インスツルメンツ

広い LLC 動作

LLC トポロジの性質上、LLC コンバータで広い動作範囲を実現するのは困難になることもありますが、広い動作範囲を実現するための方法がいくつか存在します。ここに示す 5 つのシンプルなヒントとコツはアナログ制御に対応しており、より複雑なデジタル制御実装は必要ありません。

関連コンテンツ

- [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 #137: 『デジタルコントローラを使用した LLC 電流モード制御の 2 次側での実装』](#)
- [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 #103: 『オーディオ アンプの LLC 設計上の考慮事項』](#)

以前に 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