

Technical Article

フル動作条件でのテストに先立つ、LLC 共振タンクの測定



John Dorosa

ハーフブリッジ直列共振コンバータは、100Wを上回るコンバータで高効率と高い電力密度を達成します。最も一般的な共振トポロジ (図 1) は、直列磁化インダクタ、共振インダクタ、およびコンデンサ (LLC と略記) で構成された共振タンクです。パラメータ値の選択によって、共振タンクのゲイン曲線の形状が決まり、これによってシステム内で共振コンバータがどのように動作するかが変化します。

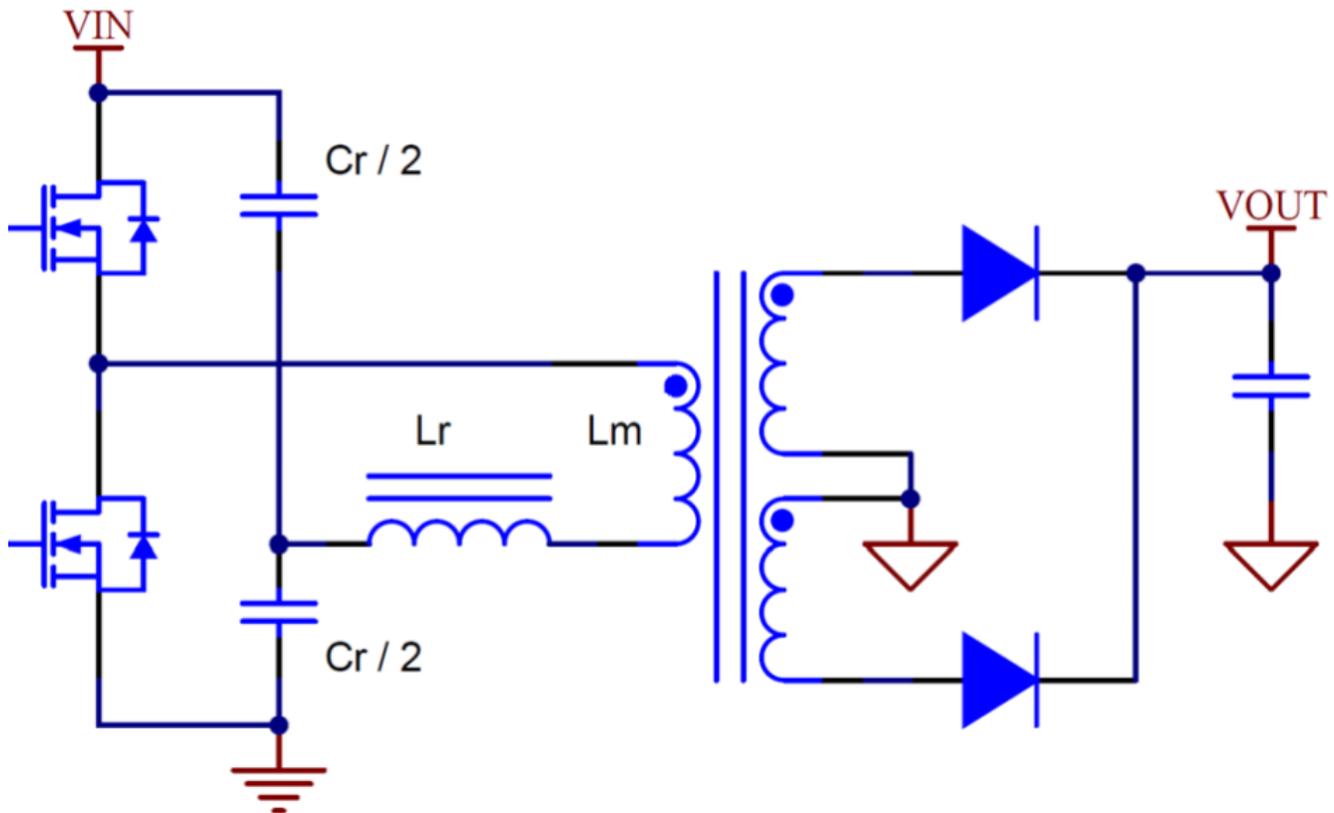


図 1. 分割共振コンデンサを使用したハーフブリッジ LLC 電力段では、パラメータ値の選択によって共振タンクのゲイン曲線の形状が決まります。回路にエネルギーを印加する前に、この曲線を検証する必要があります。出典: テキサス・インスツルメンツ

一連のパラメータを決定し、部品を選択した後、回路にエネルギーを印加する前にゲイン曲線を検証することが非常に重要です。この Power Tip では、共振タンクのゲイン曲線を測定する手法と、その結果を解釈する方法について説明します。この手法の利点と制限の両方を示す複数の例も提示します。

周波数応答アナライザは、任意の回路に小さな AC 信号を注入し、システム内の 2 点での電圧を測定して、特定の周波数範囲全体での信号ゲインと位相遅延を判定します。この機器は制御ループのテストに最も一般的に使用されますが、周波数応答アナライザを使用して LLC コンバータの電力段のゲインを測定することもできます。図 2 に、この測定の配線図を示します。

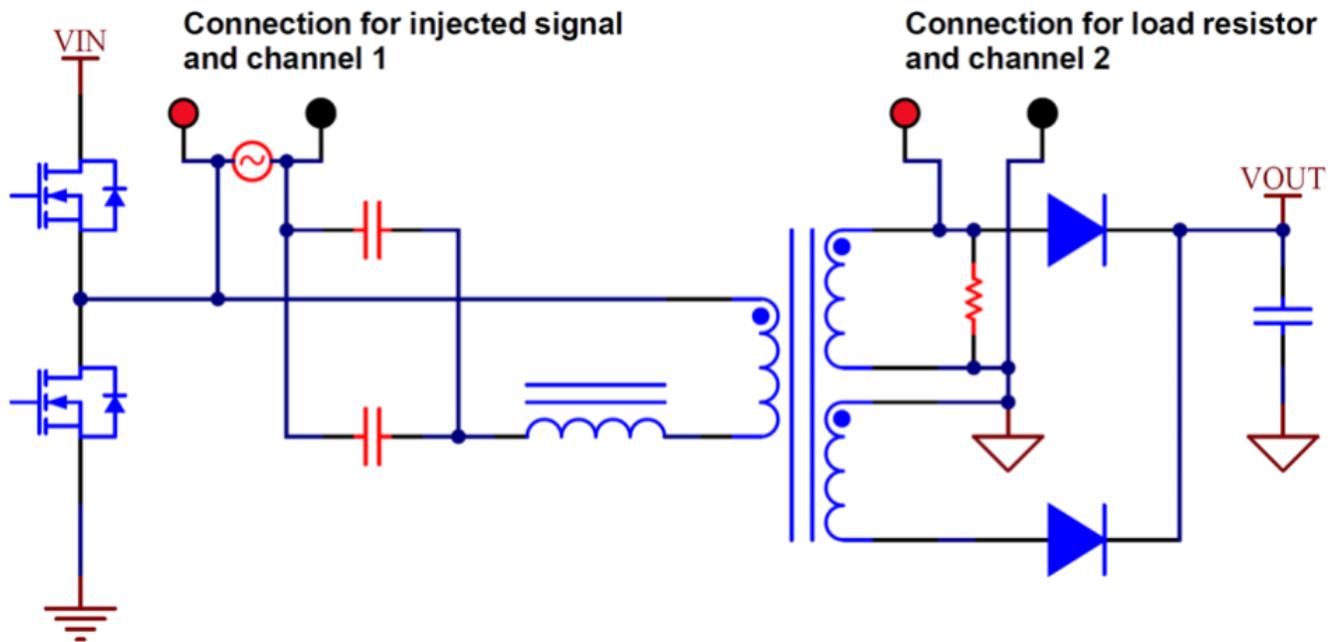


図 2. 共振タンクを周波数応答アナライザに接続し、ゲイン曲線プロットを再現する配線図。電力段のゲインプロットは、チャンネル 2 の電圧をチャンネル 1 の電圧で除算した値を表示することにより得られます。出典:テキサス・インスツルメンツ

ハーフブリッジ LLC には 1 対の共振コンデンサがあり、1 つは入力電圧に接続され、もう 1 つは 1 次側グラウンドに接続されています。この回路でテストを実行するには、共振コンデンサを互いに並列に接続し、1 次巻線とは直列に接続する必要があります。アナライザの注入信号とチャンネル 1 測定では、ハーフブリッジのスイッチングノードから共振コンデンサのもう一方の端まで、1 次側部品に接続します。アナライザの 2 次側チャンネルであるチャンネル 2 は、2 次側巻線にまたがって接続されており、負荷条件を近似するために抵抗を追加しています。注入された AC 信号の周波数を掃引した後、チャンネル 2 の電圧をチャンネル 1 の電圧で除算した値を表示することで、電力段のゲインをプロットできます。図 3 に、テスト結果の例を示します。

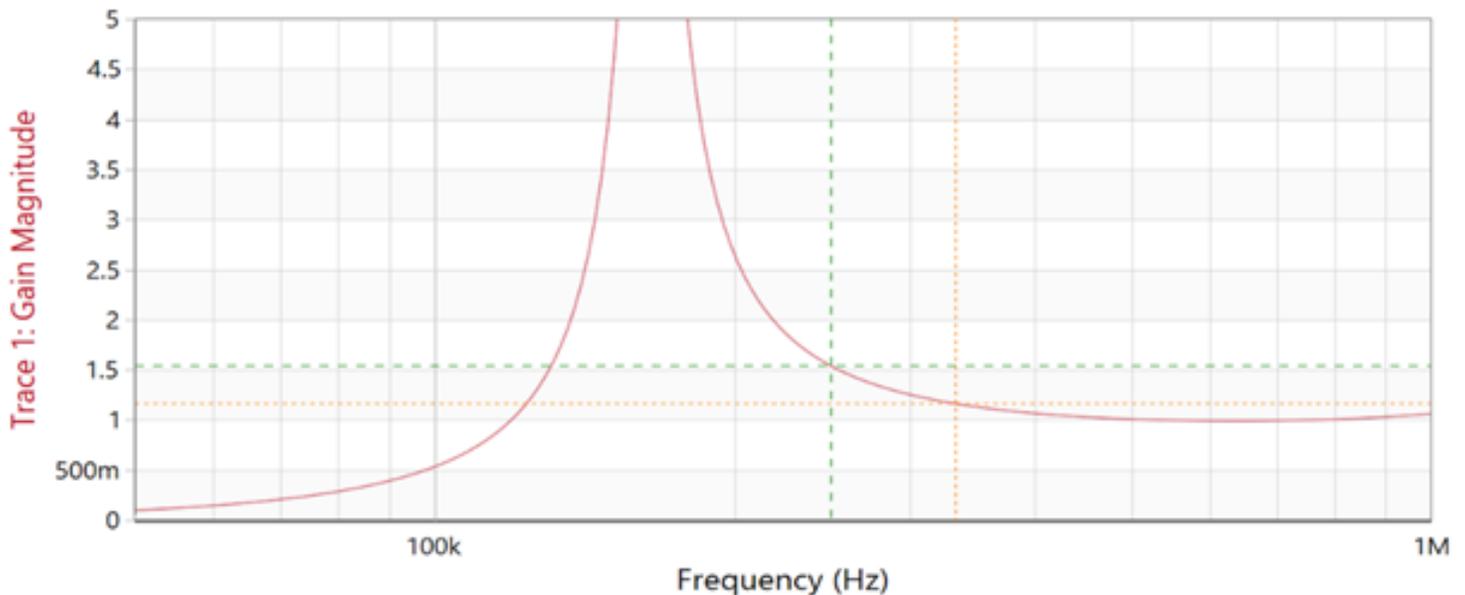


図 3. 図 2 に示したテスト構成で観測できる LLC 共振タンク ゲイン曲線測定の実例。出典:テキサス・インスツルメンツ

トランスの巻線比、電力段の 1 次側と 2 次側のスイッチおよび巻線の構成に応じて、電力段のゲインを電圧ゲインに変換できます。ハーフブリッジ LLC 電力段は通常、センタータップ付きの 2 次巻線と 2 つの出力整流器を使用して示されま

す。この例では、出力電圧は、概ね入力電圧、巻線比、動作周波数における共振タンクのゲインの積になります。図 4 に示す 2 次構成用の他のオプションを使用すると、共振タンクをより高い出力電圧に変換できます。1 次側がフルブリッジで構成されている場合、これらの比率を 2 倍にする必要があることに注意してください。

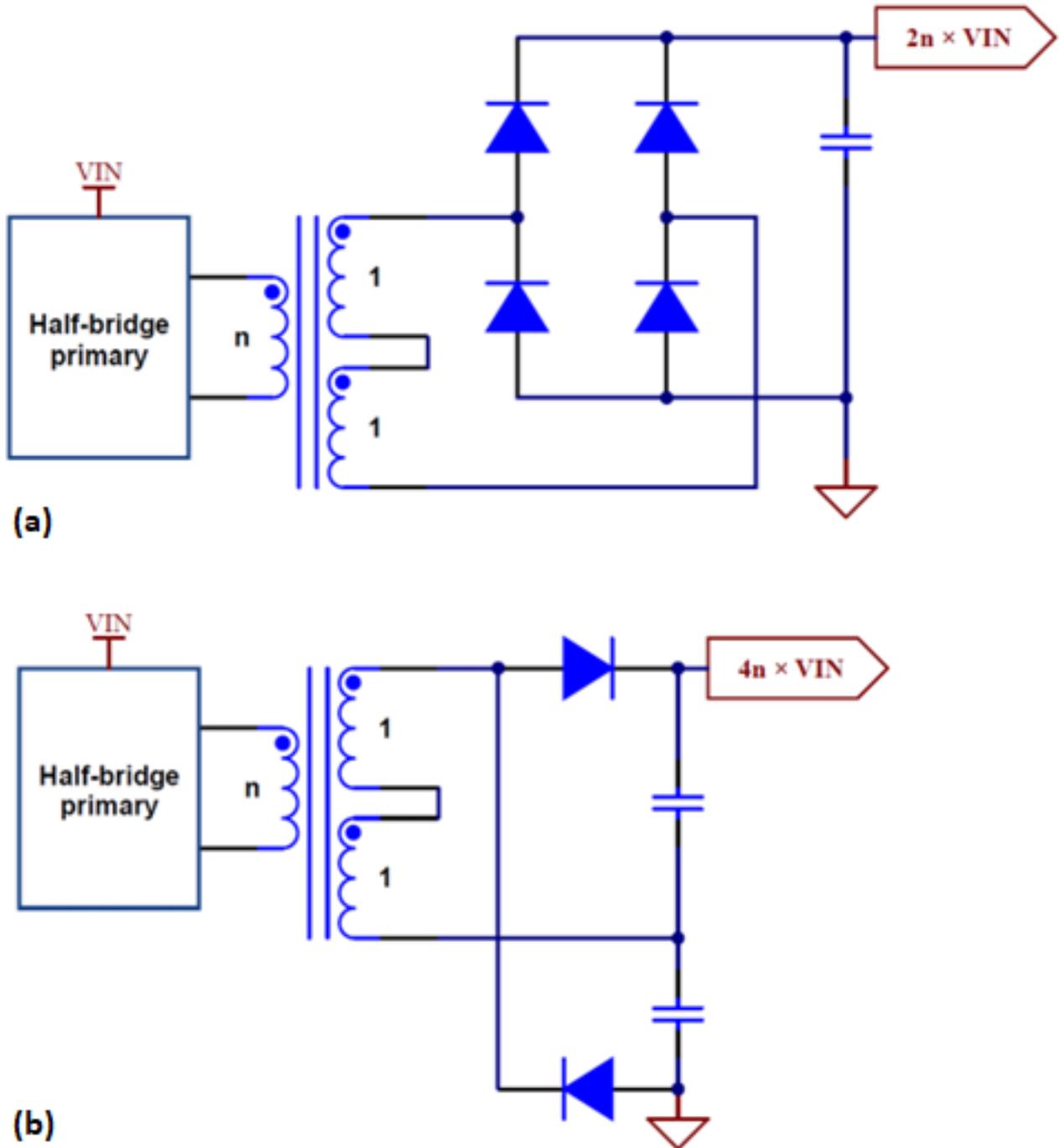


図 4. 全波整流器を使用して 2 次側を構成すると、伝送されるエネルギーが 2 倍になり (a)、ダブルエンドの 2 次側構成を使用すると、電圧ゲインは 4 倍になります (b)。出典:テキサス・インスツルメンツ

この手法の 1 つの利点は、PCB 上で直接測定を実施し、テスト結果で電力段の寄生素子を説明できることです。テキサス・インスツルメンツ E2E™ 設計サポートフォーラムの記事『[何故、LLC 共振コンバータの周波数がそんなに大きくずれているのか](#)』では、代替モデルを使用して、トランスの構造によって回路のインダクタンスがどのように増加するかを説明しています (図 5)。これら固有の寄生部品を避けて設計を行うことも、設計に統合することもできます。たとえば、漏れインダ

クタンスを共振インダクタとして使用すると、設計から物理的な部品を除外してコストを削減し、効率を向上させることができます。このクイック テストを使用すると、共振タンクの設計を簡単に最適化できます。

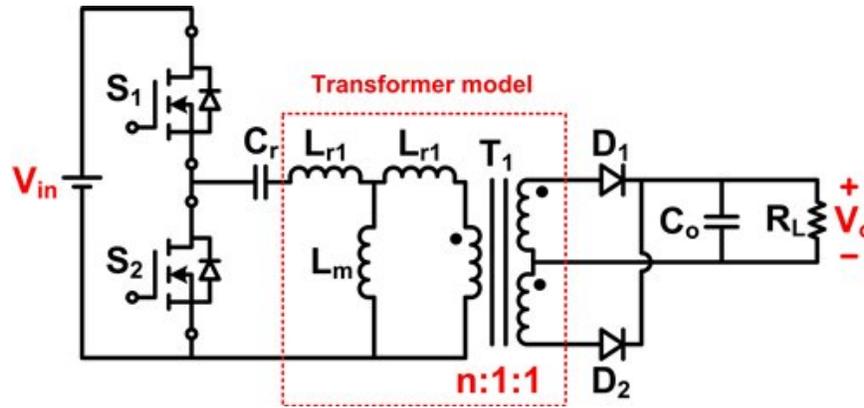


図 5. LLC コンバータの共振素子として漏れインダクタンスを使用するトランス モデルを採用すると、設計者は固有の寄生部品を回避して設計をすることも、それらの寄生部品を設計に統合することもできます。出典:テキサス・インスツルメンツ

2 次側で同期整流器を使用すると、LLC コンバータの効率がさらに向上します。そうすることで、その部品の全損失特性を支配する傾向がある導通損失が小さくなります。ただし、MOSFET を選択すると、ゲイン曲線の形状が変化する可能性があります。MOSFET の抵抗が小さいほど、出力容量が大きくなります。トランスの巻線比によってこの容量が増幅される可能性があり、場合によってはこれが問題になる場合があります。すでに説明したように、回路のゲイン曲線をテストすると、電力段全体に存在する追加の寄生素子を説明するのに役立ちます。図 6 に、共振タンクの初期設計で見過ごされていた可能性のある MOSFET 出力容量の影響を示します。

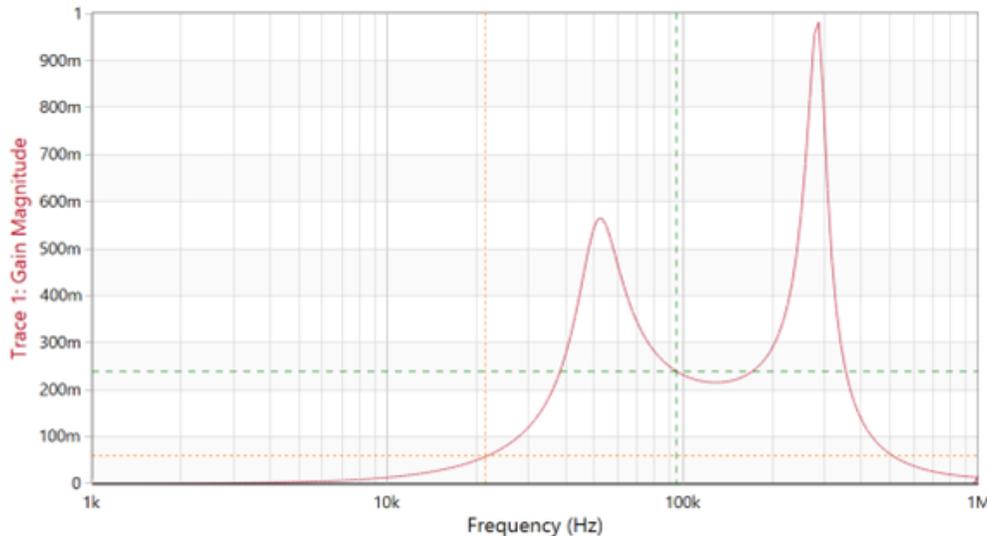


図 6. この設計では、寄生容量により、設計段階では想定していなかった 300kHz 付近の共振が加わりました。出典:テキサス・インスツルメンツ

ただし、周波数応答アナライザを使用して、設計の寄生成分すべてを考慮に入れることはできません。たとえば、センタータップ構造で互いに良好に結合していない 2 次巻線が及ぼす影響は、測定値には表れません。1 次巻線と 2 次巻線間の結合が緩やかな場合、漏れインダクタンスが形成されますが、これは LLC 設計ではある程度有利に働きます。ただし、2 次側巻線が互いに適切に結合していないと、電力段の性能が低下します。AC 分析ではこの影響を観測することはできませんが、2 次巻線の電圧を監視すると明らかになります。

たとえば、図 7 の設計では適切なゲイン曲線を使用していました。一方 2 次巻線の両端の電圧に注目すると、高い電圧レベルから始まり、出力電圧より低い電圧まで低下していました。理想的には、これらの電圧波形が方形波に似ている必

要があります。結合が緩やかだと、2次側整流器のターンオフ エッジで大きな漏れスパイクが発生することもあります。負荷が大きくなると、互いに緩やかに結合している2次側の歪効果がより顕著になり、可能な出力電力が制限されます。

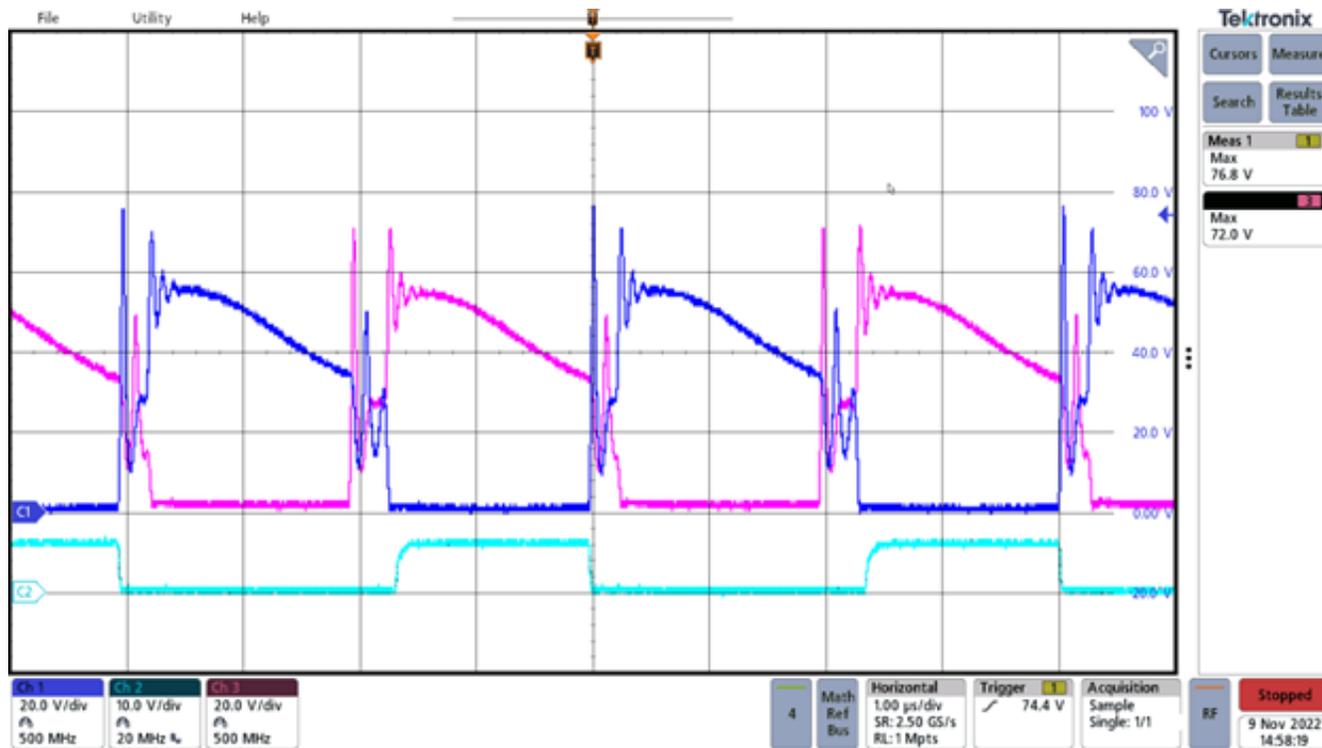


図 7. トランス設計での結合の緩みは、スイッチング波形では顕著ですが、ゲイン曲線では明らかではありませんでした。
出典: テキサス・インスツルメンツ

2次側巻線をよりの確に相互結合できるようにこのトランスの設計を再構成した後も、結果として生じる共振インダクタンスと磁化インダクタンスは同じ値にとどまります。測定したゲイン曲線には、予想どおり見た目の差はありませんでした。しかし、[図 8](#) のスイッチング波形は、新しい設計による顕著な改善を示しています。

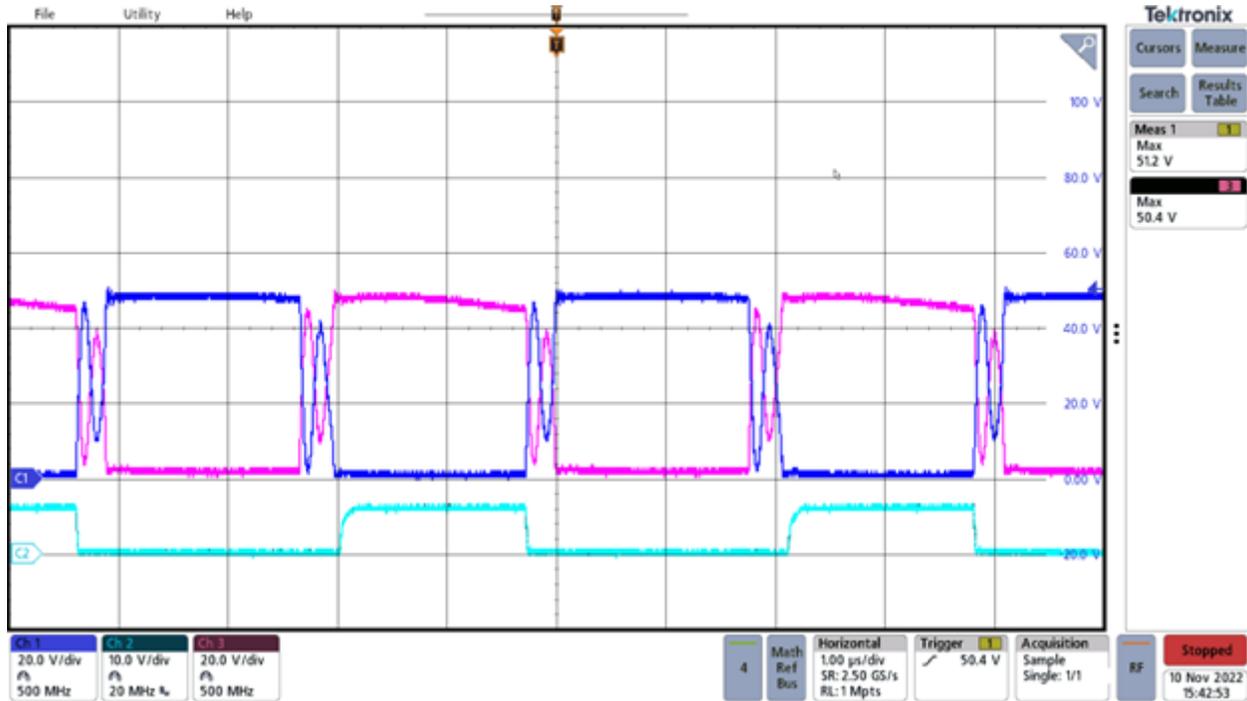


図 8. トランスの設計を改良して結合を改善すると、ゲイン曲線の形状を維持しつつ、電圧ドループが緩和しました。出典: テキサス・インスツルメンツ

2 次側巻線を再構成すると、スイッチング波形は予想に近い形になります。ブロッキング電圧が出力電圧に等しくなり、波形はより方形波に近くなります。ターンオフ エッジによる漏れスパイクも除去できました。

2 つのトランスの設計は実質的に同じで、追加部品は必要ありません。それでも、この変更は全体的な効率に大きな影響を及ぼしています。

共振コンバータを設計する場合、共振タンクのゲイン曲線を検証して評価を開始してください。すべての障害を検出することはできませんが、実現可能なゲインや予測される動作周波数範囲についてある程度の知見を得ることができます。

関連コンテンツ

- [Power Tip #84:『LLC 直列共振コンバータの箱の外で考える』](#)
- [Power Tips #103:『オーディオ アンプの LLC 設計上の考慮事項』](#)
- [Power Tips #89:『高周波共振コンバータ設計上の考慮事項、パート 1』](#)
- [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』](#)
- [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』](#)

参考情報

- [Power Tips:『LLC 直列共振コンバータ設計を知る』](#)
- [Power Tips:『LLC 直列共振コンバータでできること』](#)
- [Power Tips:『LLC 共振ハーフブリッジ パワー コンバータの設計』](#)

以前 [EDN.com](#) で公開されたものです。

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 © 2024, 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、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、

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](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 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。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。

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、TI 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 © 2024, Texas Instruments Incorporated