

Technical Article

高周波共振コンバータ設計上の考慮事項、パート 1



Sheng-Yang Yu

高周波共振コンバータの設計上の検討事項として、部品の選定、寄生パラメータを使用した設計、同期整流器の設計、電圧ゲインの設計などを挙げるすることができます。この Power Tip は、スイッチング部品の選択に影響を及ぼす主なパラメータと、高周波共振コンバータにおけるトランスの巻線内静電容量の影響に焦点を当てています。

この 10 年間で、ワイドバンドギャップ (WBG) デバイスが商用化された結果、はるかに高い周波数でのパワー コンバータ動作が可能になり、電力密度を高めることができました。高性能な電源には、WBG デバイス、特にシリコン カーバイドや窒化ガリウム電界効果トランジスタ (FET) が組み込まれ始めています。これは、出力容量 (C_{oss})、ゲート電荷 (Q_g)、オン抵抗 ($R_{DS(on)}$)、逆回復電荷 (Q_{rr}) が原因で、同じブレークダウン電圧レベルでシリコンまたはシリコンのスーパー ジャンクション FET よりも低くなるか存在しない状態になります。 Q_g が小さいほど、必要な駆動電力が減少し ($P_{drive} = V_{drive} Q_g F_{sw}$)、 $R_{DS(on)}$ が小さいほど導通損失が低減します。ここで、 V_{drive} は駆動電圧、 F_{sw} は FET のスイッチング周波数です。 Q_g と $R_{DS(on)}$ 以外に、高周波コンバータで部品を選定する際には、 C_{oss} と Q_{rr} も考慮することが重要です。

図 1 に示すインダクタ - インダクタ - コンデンサ直列共振コンバータ (LLC-SRC) などの共振コンバータでは、ゼロ電圧スイッチング (ZVS) を実現するために、共振タンクの電流によって FET の C_{oss} (図 2 の状態 1) が充電/放電されます。ZVS は、ゲート電圧が高くなる前に、FET のドレイン - ソース間電圧 (V_{DS}) がゼロに達していることを意味します。したがって、 C_{oss} が低いほど、同じ共振タンク電流レベルの下でデッドタイムを短縮して ZVS を実現できます。デッドタイムが短いということは、デューティサイクルが長くなり、1 次側共振タンクと FET の 2 乗平均平方根 (RMS) 電流が小さくなることを意味します。これは、効率が向上し、より高いスイッチング周波数でコンバータを動作させる能力があります。

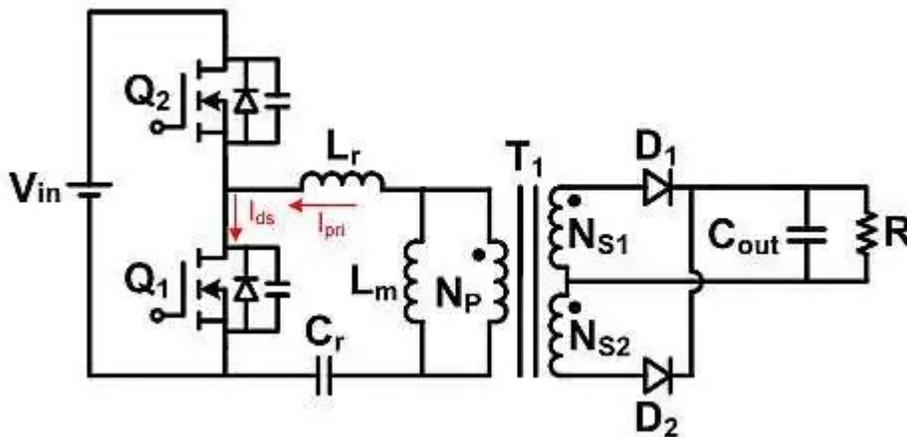


図 1. LLC-SRC

ZVS を実現するために、常に、FET のボディダイオードが電流を伝導する期間があります(図 2 の状態 2)。ボディダイオードが電流を流しているときに FET に Q_{rr} が生じて再度オンになると、FET 自体によって Q_{rr} が放電する逆電流が発生し、ハードスイッチングと高電圧ストレスが発生して FET の損傷を招く可能性があります。

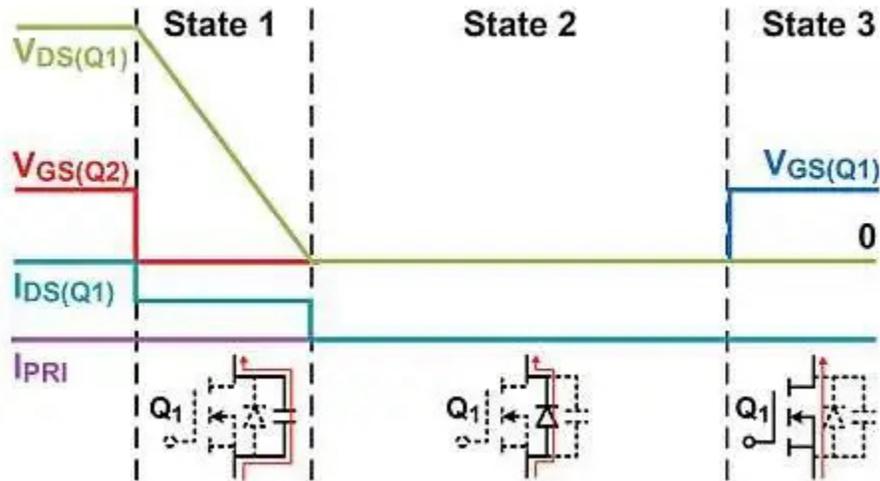


図 2. LLC-SRC のスイッチング遷移

図 3 に、LLC-SRC の起動プロセス時に発生するこのハードスイッチング現象を示します (図 1 を参照)。FET Q_2 が最初に電流を導通すると、インダクタ電流 I_{PRI} が上昇します。その後、電流 I_{PRI} は、FET Q_1 チャンネルとボディダイオードを経由して導通します。電流を逆方向に流れるのを防ぎながら、FET Q_2 が再度オンになります。 Q_{rr} に起因して、FET Q_1 は Q_{rr} を放電するために自己逆電流を生成し、高い電圧ストレスが生じます。

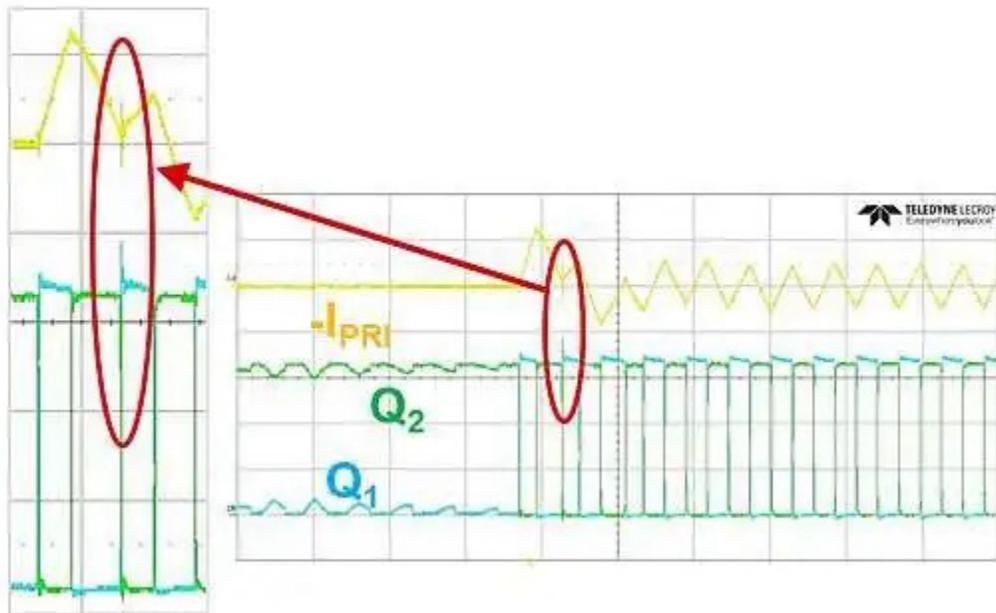


図 3. Q_{rr} に起因するハードスイッチング

高周波共振コンバータの場合、共振タンクのインピーダンスは、一般的に、低周波共振コンバータのインピーダンスよりもはるかに低くなります。そのため、高周波共振コンバータでは、スタートアップ時の突入電流はさらに大きくなることが予想されます。図 1 の LLC-SRC を例に使用すると、出力電圧がゼロのとき (スタートアップ時の初期条件)、 Q_2 が最初に導通したときのスタートアップ電流を制限する唯一のインピーダンスは、LLC-SRC の直列共振インダクタ L_r です。高効率で高周波の共振コンバータ設計、特にバスコンバータでは、効率を向上させるために一般的に L_r を最小化します。 L_r 値が小さいと、同じスタートアップ周波数におけるスタートアップ電流が大きくなるため、 Q_{rr} に関連するハードスイッチングの影響を受けやすくなります。そのため、高周波共振コンバータでは低 Q_{rr} FET を使用することが不可欠です。

前述の WBG デバイスの利点を活用することにより、従来の絶縁電源よりも 5 ~ 10 倍の速度で、絶縁共振コンバータをメガヘルツ帯域で動作させることができます。高周波数ドメインでは、コンバータの設計プロセスにおいて「無視できる」と考えられていた多くのパラメータは、トランスの巻線内コンデンサなど、もはや無視できません。

従来の共振コンバータ設計プロセスでは、ZVS を実現するために、設計者は共振タンクに蓄積されたエネルギーが FET C_{oss} に蓄積されたエネルギーよりも大きいことを確認する必要があります。これにより、 C_{oss} が共振タンクに蓄積されたエネルギーをより消費させます。図 1 に示す LLC-SRC を例にとると、式 1 によってこの不等式の有効性が確認されます。

$$L_m I_{Lm}^2 \geq 2C_{oss} V_{in}^2 \quad (1)$$

ここで、 I_{Lm} は磁化インダクタ L_m のピーク電流、 V_{in} は LLC-SRC の入力電圧です。式 1 は、インダクタを L_m に適用すると、式 2 に書き換えることができます。

$$L_m \leq \frac{n^2 V_{out}^2}{32 C_{oss} V_{in}^2 F_{sw}^2} \quad (2)$$

ここで、 $n = N_p : N_{s1}$ ($N_{s1} = N_{s2}$ と仮定) はトランスの巻線比、 V_{out} は出力電圧です。

共振コンバータの設計が広い動作範囲とホールドアップ時間に対応する必要がある場合、 $L_n = L_m / L_r$ を Low に維持するため、 L_m は一般に式 2 の右側の値よりもはるかに小さくなります (閉ループ LLC-SRC 設計で L_n の値を 4 から 10 まで適用)。バス コンバータなどの共振コンバータ設計に高いコンバータ効率が必要な場合、 L_m を最大化することで 1 次側 RMS 電流が小さくなり、導通損失が小さくなります。この場合、 L_m の値は、式 2 の右側の値に近くなります。式 2 は理想的なトランスを使用した場合の理想的な条件のみを表します。実際のトランスでは、多くのパラメータが C_{oss} の充電/放電能力に影響を及ぼす可能性があります。最も重要なパラメータは巻線内の静電容量です。

図 4 に、LLC-SRC のスイッチング過渡時の簡略化された回路モデルを示します。ここでは、 L_m (I_{Lm}) の電流が C_{eq} (共振コンデンサ C_r と直列に接続された 2 つの FET の C_{oss}) を放電します (ここでは C_r を電圧源と仮定しています)。トランスの巻線内容量 (C_{TX}) がないと、すべての I_{Lm} が C_{eq} になり、式 2 が有効になります。ただし、 C_{TX} が存在するため、トランスの巻線の極性を変更するには、一部の I_{Lm} を C_{TX} に接続する必要があります。これにより、 C_{oss} の放電能力が低下し、ZVS が失われる可能性が高くなります。したがって、1 次巻線の層を各層から離して、2 次巻線の層の距離だけでなく、2 次巻線の層の距離も考慮することで、 C_{TX} を低く保つことが不可欠です。

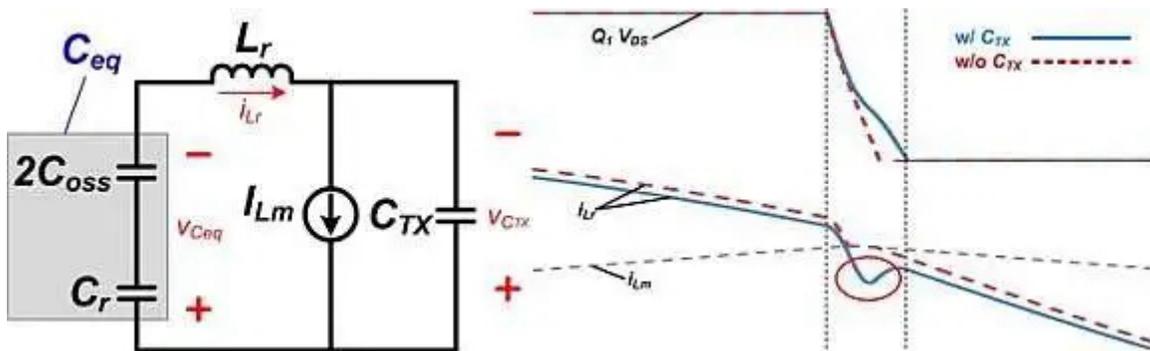


図 4. トランスの巻線内コンデンサの効果

L_m 値を決定する際の目安として、式 2 を使用して計算された最大 L_m 値のわずか半分しか使用しません。トランスを実際に構築する前に、 C_{TX} 値を予測するのは一般的に困難であるためです。400V 入力のコピーでは、 C_{TX} は一般に 22pF ~ 100pF の範囲内に収まります。また、マージンをもって L_m を十分に低く抑えるために、トランスの構造が固定してから回路シミュレーションで C_{TX} をモデル化するのも非常に役立ちます。

このシリーズの次回の投稿では、高周波共振コンバータ設計における同期整流器の設計上の課題に焦点を当てます。

関連記事:

- [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』](#)
- [MOSFET Qrr:『電力効率を追求する上での危険の無視』](#)
- [『ハーフブリッジ共振 LLC コンバータと 1 次側 MOSFET を選択する際の設計上の考慮事項』](#)
- [『疑似共振コンバータと共振コンバータの使用』](#)

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