

## Technical Article

## 高周波共振コンバータ設計における検討事項 (第二部)



Sheng-Yang Yu

このシリーズのパート 1 では、共振コンバータの設計に影響を及ぼす主な寄生パラメータと、部品の選定基準およびトランスの設計に焦点を置きました。この記事では、共振コンバータの同期整流器 (SR) の設計に関する検討事項を説明します。

共振コンバータの動作状態は、パルス幅変調コンバータよりもかなり複雑になる可能性があります。図 1 のインダクタ - インダクタ - コンデンサ直列共振コンバータ (LLC-SRC) を例にとると、通常の LLC-SRC 設計には、負荷条件およびスイッチング周波数 ( $f_{sw}$ ) と直列共振周波数 ( $f_r$ ) の相対関係によって、4 つの共通状態 (図 2) があります。 $f_{sw} < f_r$  のとき、整流ダイオードの電流はゼロになり、アクティブ スイッチ ( $Q_1$  または  $Q_2$ ) がオフになります。そのため、整流器 (SR) として MOSFET (金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ) を使用する場合、整流器への逆電流を防止するため、デューティサイクルを 50% 未満にして SR をオフにする必要があります。そうしないと、過剰な循環電流によってコンバータの効率が低下します。

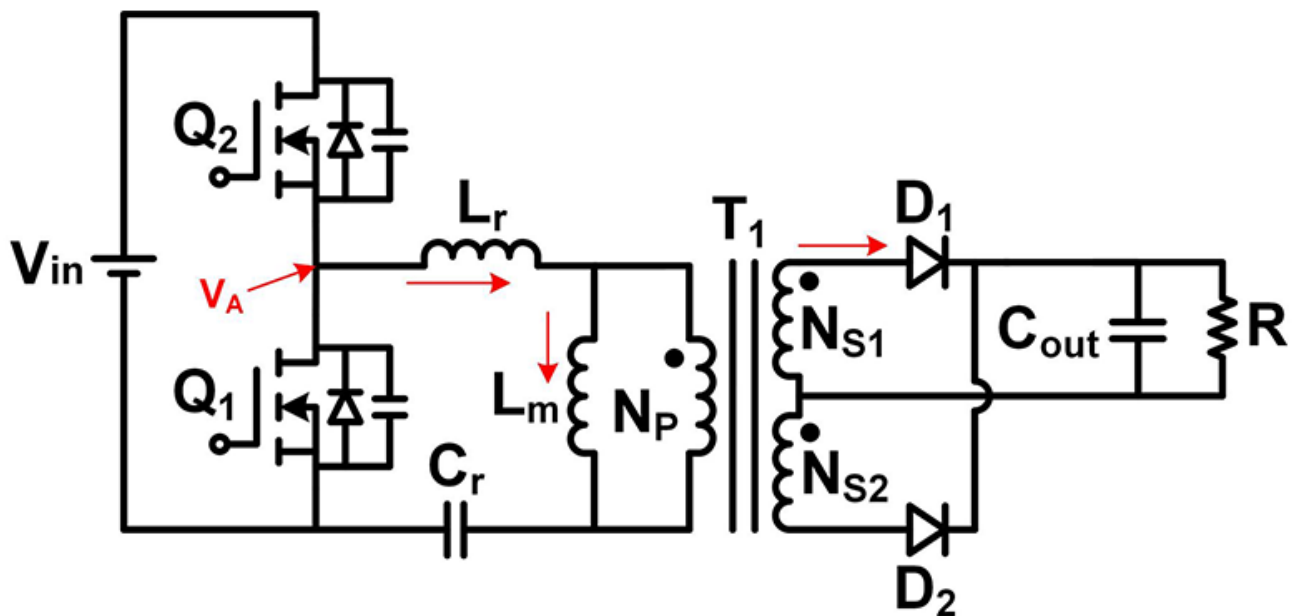


図 1. インダクタ - コンデンサ直列共振コンバータ (LLC-SRC) はソフト スイッチング機能を持ち、高周波動作が可能。

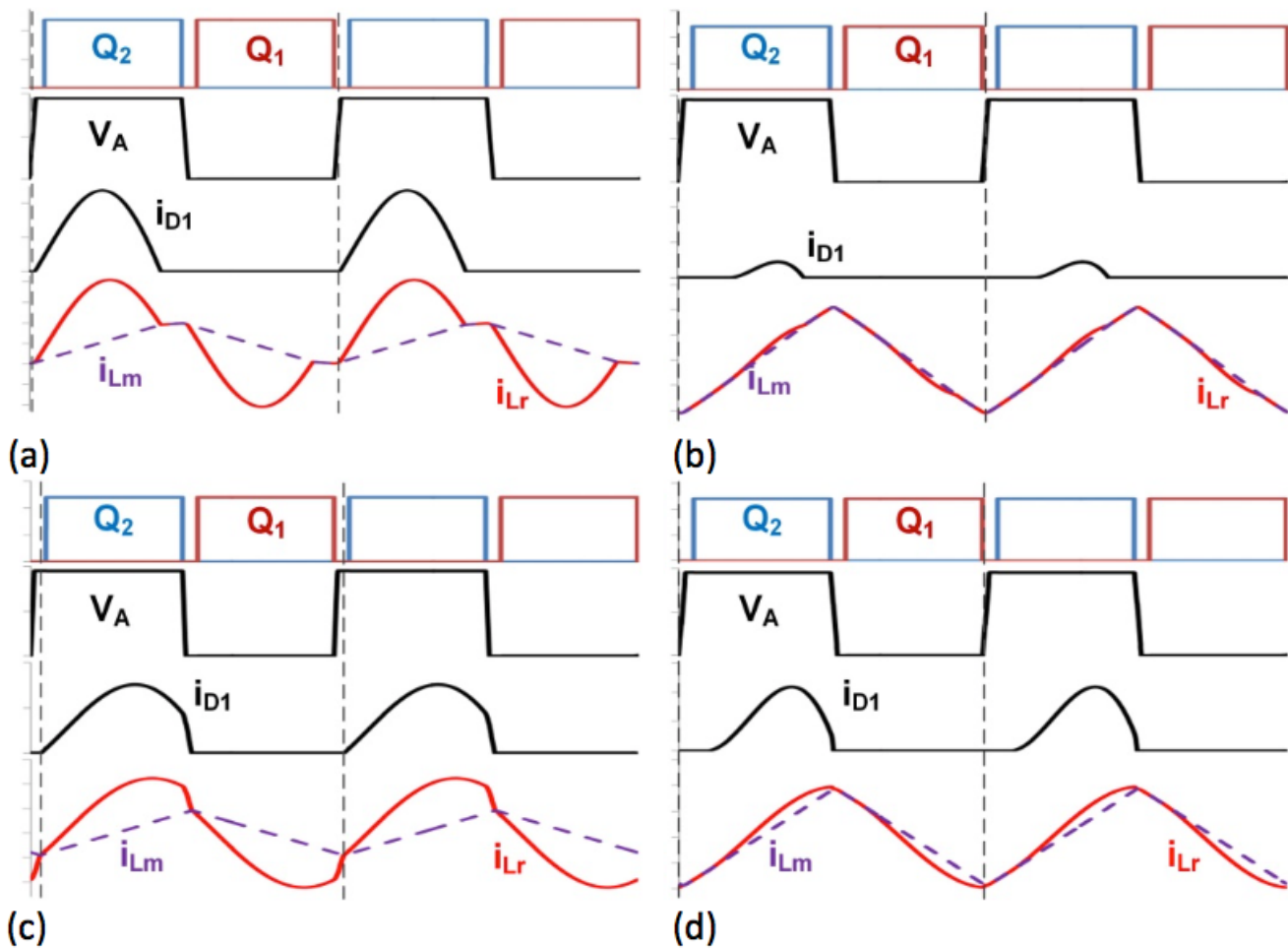


図 2. (a) 重負荷および  $f_{sw} < r$ 、(b) 軽負荷および  $f_{sw} < r$ 、(c) 重負荷および  $f_{sw} > r$ 、(d) 軽負荷および  $f_{sw} > r$  における LLC-SRC の動作状態 (SR を使用する場合に出力整流器への逆電流を防止するため、電流センシングが必要)。

整流器の電流導通時間は、重負荷および  $f_{sw} < r$  の場合は  $0.5/f_r$  です。そのため、重負荷および  $f_{sw} < r$  の場合に SR の導通時間を  $0.5/f_r$  よりわずかに短くし、軽負荷の場合には SR をディスエーブルにすることが可能です [1]。ただし、この開ループの SR 制御方法では、コンバータの効率を最適化できません。

より信頼性の高い SR 制御方法として、MOSFET のドレイン - ソース間電圧 ( $V_{DS}$ ) センシングを使用する方法があります [2] (図 3)。この SR 制御方法では、MOSFET の  $V_{DS}$  を 2 つの異なる電圧スレッシュホールドと比較して MOSFET のオン/オフを切り替えます。テキサス・インスツルメンツの UCC24624 など、新しい  $V_{DS}$  センシング SR コントローラの中には、最小の遅延で高速な SR ターンオフを実現するため、比例ゲートドライバをアクティブにする第 3 の電圧スレッシュホールドを持つものもあります。

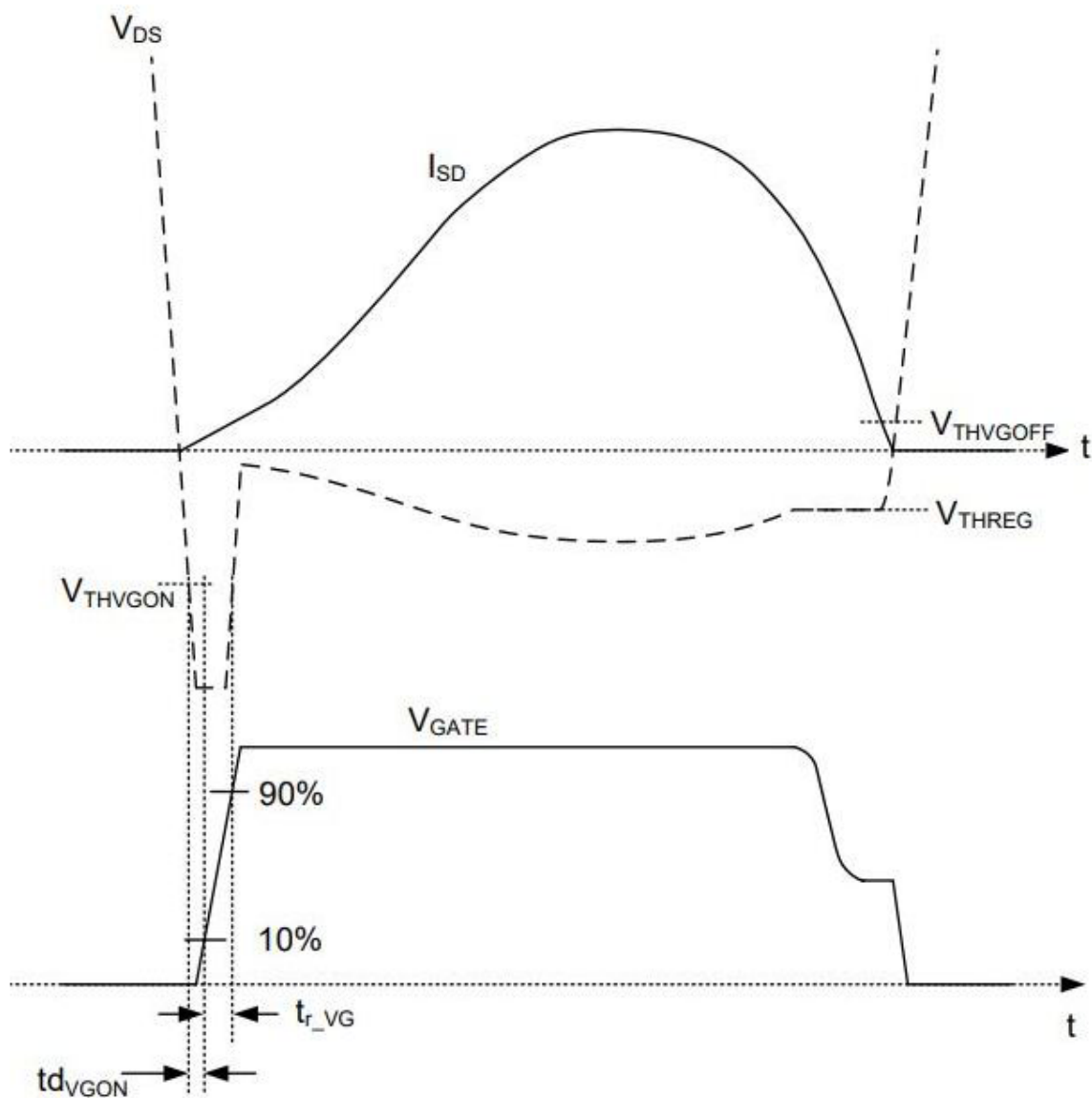


図 3.  $V_{DS}$  センシング SR により、異なる  $V_{DS}$  電圧レベルで SR のオン / オフを切り替え

電圧スレッショルドは mV レベルであるため、高精度のセンシング回路が必要です。  $V_{DS}$  センシング方法は一般的に、  $V_{DS}$  レベル (通常 200V 未満) と  $f_{sw}$  制限 (通常 400kHz 未満) を持つ IC を使用することで実現できます。  $V_{DS}$  センシングによる SR 制御方法には制限があるため、別の SR 制御方式を使用して、高電圧および高周波共振コンバータの SR 導通を最適化する必要があります。

高周波共振コンバータ SR を制御する別の方法として、ログスキー コイル [3] と、その後積分器とコンパレータを使用する方法があります。図 4 に、コンデンサ - インダクタ - インダクタ - インダクタ - コンデンサ直列共振デュアル アクティブブリッジコンバータ (CLLLC-SRes-DAB) 上にログスキー コイルを配置した SR 制御のブロック図を示します [4]。電流センシング用に、巻線付き空芯コイル (ログスキー コイル) をトランス巻線に配置します。時変電流がコイルを流れると、電流で生成された磁束によってコイル巻線に電圧が誘導されます。誘導電圧と元の時変電流には、90 度の位相差があります。

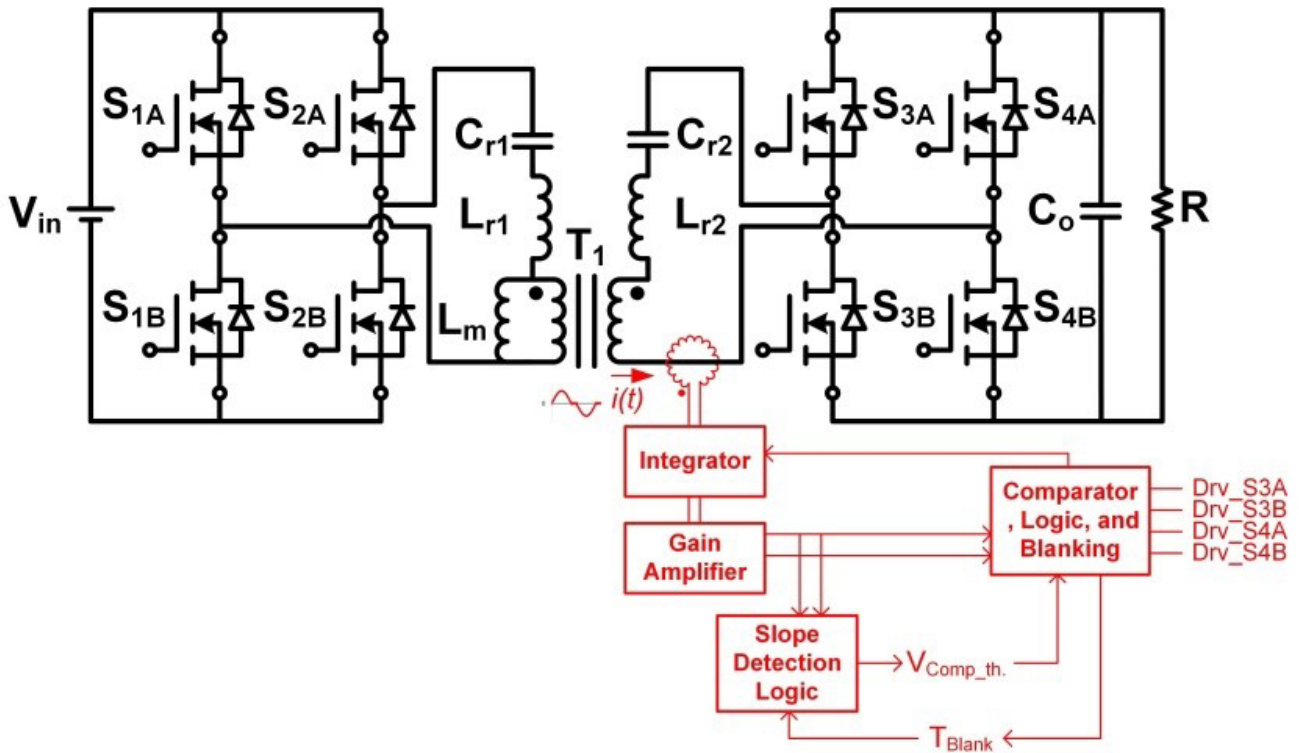


図 4. ロゴスキー コイルの SR 制御により、CLLLC-SRes-DAB コンバータで高精度の高周波 SR センシングと制御が可能

ロゴスキー コイルの後に積分器を追加すると、元の時変電流と同位相の電圧、またはそれに先行する電圧を生成できます。つまり、可能な伝搬および制御遅延に対応するため、積分器出力のゼロ電圧交差が時変電流のゼロ電流交差よりも少し早く発生するよう設定することもできるということです。その後、増幅された積分器の出力信号を指定されたコンパレータのスレッシュホールドと比較して、SR 導通時間がほぼ最適化された SR 駆動信号を生成します。制御回路にスロープ検出ロジックを追加すると、さまざまな負荷条件にわたって SR の導通時間をさらに最適化できます。ロゴスキー コイルは磁束によって電流を検出するため、電圧レベルの制限はありません。また、ロゴスキー コイルは磁気コア材料の代わりに空芯を使用するため、帯域幅が非常に広くなり、飽和制限はありません。そのため、 $V_{DS}$  センシングによる SR 制御方法とは異なり、MHz レベルの共振コンバータでも、周波数制限の懸念はありません。

図 5 に、ここで提案する方法を示します。図 5 の時変電流を  $i(t)$  と定義し、ロゴスキー コイルがトランス巻線に垂直に配置されていると想定すると、ロゴスキー コイル巻線の出力電圧は式 1 を使用して計算できます。

$$V_{1,0}(t) = \frac{-AN\mu_0}{l} \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

ここで  $A$  はロゴスキー コイルの 1 巻の断面積 (ロゴスキー コイルのすべての 1 巻の断面積が同じであると想定)、 $N$  はロゴスキー コイルの巻数、 $l$  はロゴスキー コイルのリングの円周、 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$  は透磁率定数です。

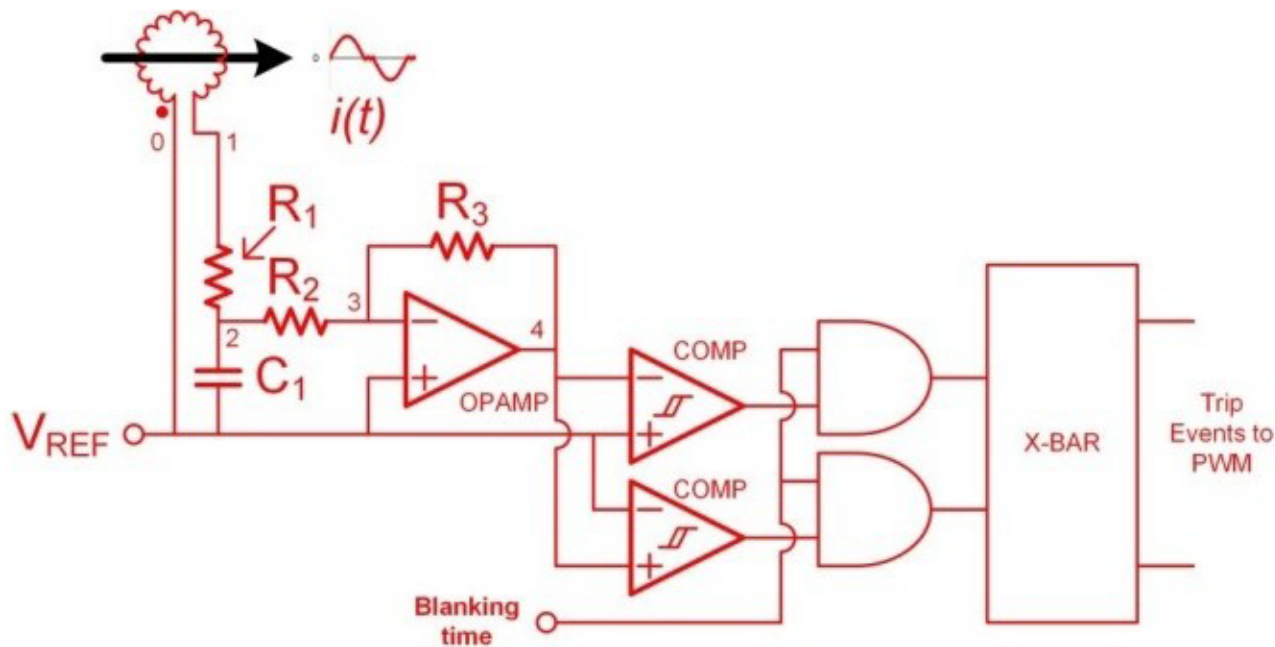


図 5. パッシブ積分器により、ログスキー コイルの SR 制御回路でゼロ電流交差のタイミングを予測可能

提案するセンシング回路で理想的なオペアンプを使用していると想定した場合、ログスキー コイルの出力  $V_{1\_0}$  とパッシブ積分器の出力  $V_{2\_0}$  の電圧関係は式 2 で表されます。

$$\frac{dv_{2\_0}(t)}{dt} + \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} \right) V_{2\_0}(t) = \frac{V_{1\_0}(t)}{R_1 C_1} \quad (2)$$

式 2 の微分方程式は、式 3 の形で解くことができます。

$$V_{2\_0}(t) = \frac{1}{T} \int I \frac{V_{1\_0}(t)}{R_1 C_1} dt + \frac{a_0}{T} \quad (3)$$

ここで、 $a_0$  は式 4 で表される定数です。

$$I = e^{\left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} \right) t} + \text{constant} \quad (4)$$

パッシブ積分器とアンプを使用して位相差を調整する方法を理解しやすくするため、時変電流が純粋な正弦波であるとすると、ログスキー コイルの出力電圧と積分器の出力は両方とも正弦波になります。つまり、式 1 と式 2 を使用し、 $v_{2\_0}(t) = a_1 \sin(\omega t)$  と想定して  $i(t)$  を求めるため、式 2 を式 5 のように書き換えることができます。

$$i(t) = \frac{a_1 l}{AN\mu_0} \sin\left(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

ここで、式 6 は次のとおりです。

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{a_1 \omega}{a_2}\right) = \tan^{-1}\left[\frac{\omega}{\left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1}\right)}\right] \quad (6)$$

ログスキー コイルのピン配置を反転すると、時変電流は式 7 のようになります。

$$i(t) = \frac{a_1 l}{AN\mu_0} \sin\left(\omega t + \phi - \frac{\pi}{2}\right) \quad (7)$$



ロゴスキー コイルの出力と積分器の入力との接続極性を適切に設定し、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $C_1$ 、 $f_{sw}$  ( $\omega = 2\pi f_{sw}$ ) の値を変化させることにより、式 3 で  $\Phi = -\pi/2$  とし、式 4 で  $\Phi = \pi/2$  とすると、積分器の出力  $v_{2,0}(t)$  を SR の電流  $i(t)$  と同相にできます。さらに、実用的なアプリケーションでは、積分器の波形を SR 電流を先行するように設定できます。そのため、コントローラとドライバにそれぞれ応答時間と伝搬遅延があっても、ゼロ電流交差点で SR をターンオフさせることができます。

図 6 に、センシング回路の巻線電流測定値とゲイン アンプの出力電圧を示します。この図からわかるように、ゼロ電圧交差を実際のセンシング電流よりも早くターンオフするようにプログラムすると、伝搬遅延と制御遅延に対応できます。

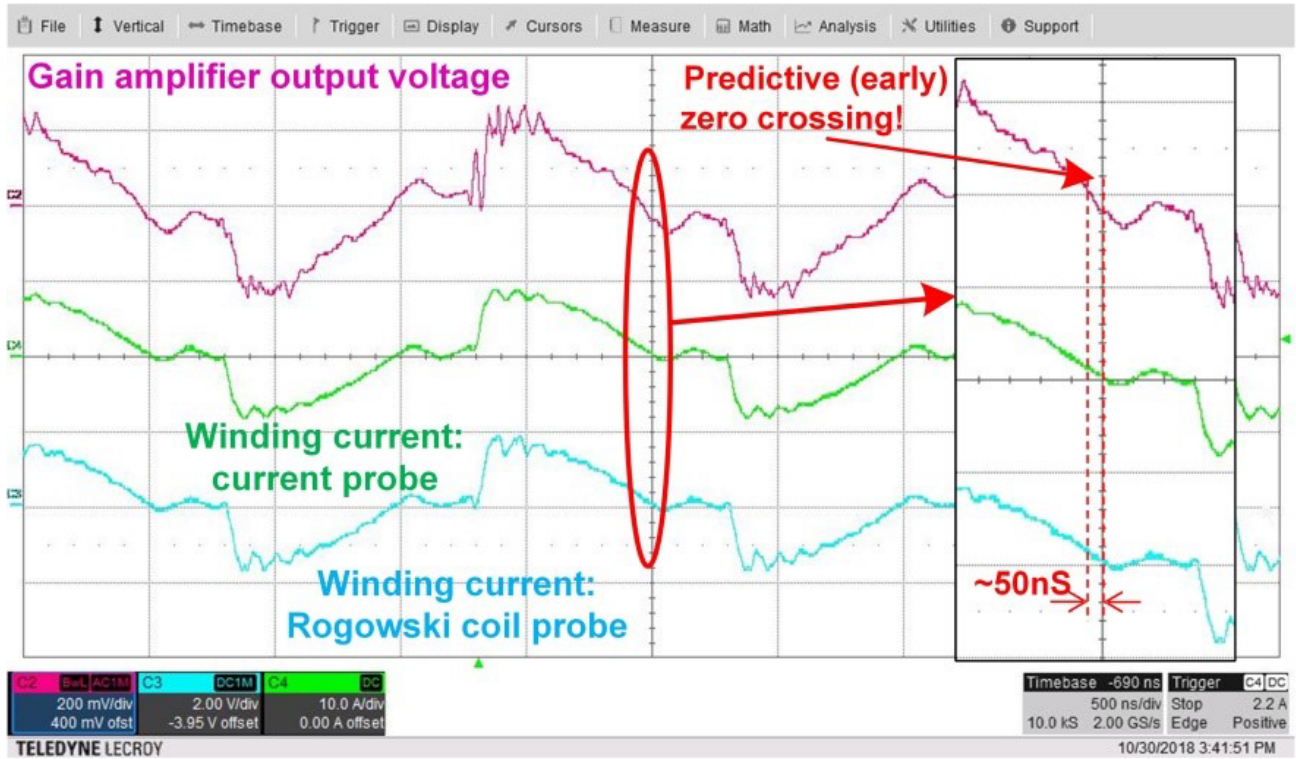
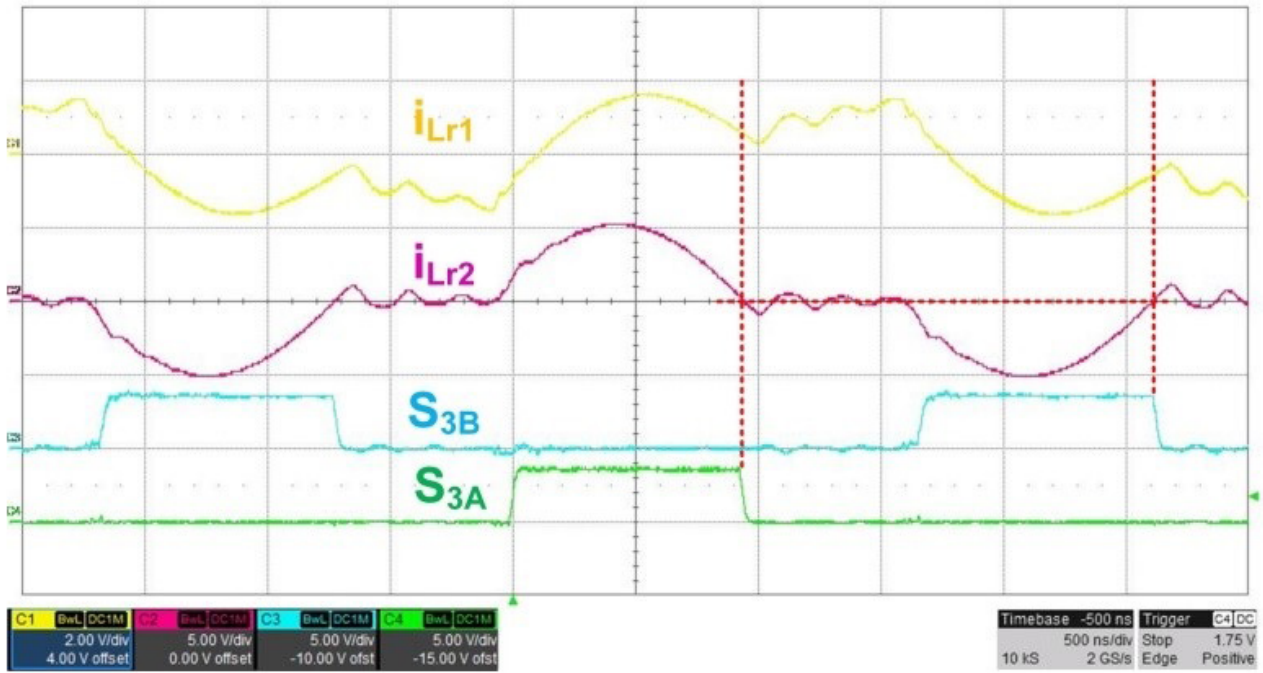
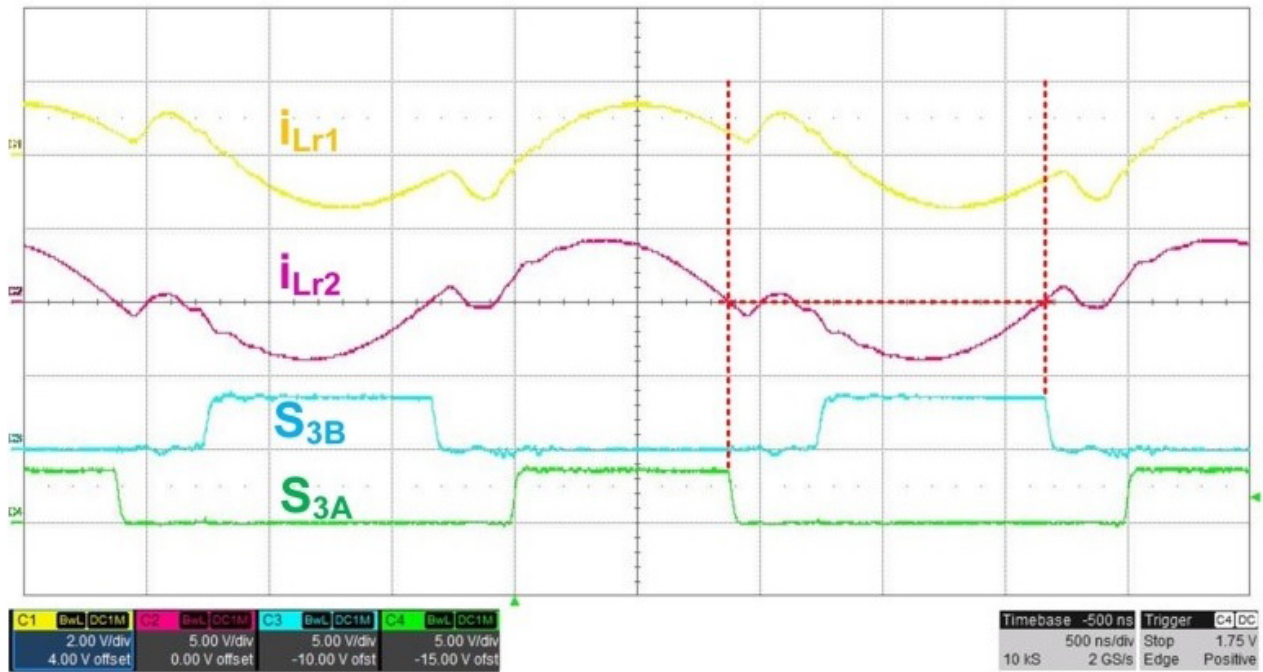


図 6. SR 電流測定の比較:積分器出力でのゼロ電流交差を実際のゼロ電流交差よりも早めることにより、予測的な SR センシングを実現

図 7 に、スイッチング周波数が直列共振周波数を下回ったときの理想的な SR ターンオフ タイミングを示します。



(a)



(b)

図 7. SR がゼロ電流交差時に理想的にターンオフ: (a) 300kHz、(b) 400kHz。

## 参考資料

1. J.Wang, B.Lu『LLC 共振コンバータ用開ループ同期整流器ドライバ』、Proc.APEC、2013 年、pp. 2048～2051。
2. 『UCC24624 LLC 共振コンバータ用、デュアルチャネル同期整流器コントローラ』、テキサス・インスツルメンツ
3. M.H.Samimi, A. Mahari, M.A. Farahnakian, H. Mohseni, 『ロゴスキー コイルの原理と応用: 考察』、IEEE Sensors Journal, vol. 15, pp. 651～658, 2015 年。
4. B. Zhao, Q. Song, W. Liu, Y. Sun, 『高周波リンク電力変換システム用デュアル アクティブ ブリッジ絶縁型双方向 DC-DC コンバータの概要』、IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, pp. 4091～4106, 2014 年。

## 関連記事

- 『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』
- 『疑似共振コンバータと共振コンバータの使用』
- 『ロゴスキー電流プローブによる低インピーダンスの測定』
- 『デジタル制御を使用した高効率共振モードの実装』
- 『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』

以前 [EDN.com](http://EDN.com) で公開された記事です。



## 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