

Technical Article

ESS における双方向 CLLLC 共振コンバータの制御方式



Guangzhi Cui

はじめに

双方向のコンデンサ - インダクタ - インダクタ - コンデンサ (CLLLC) などの單一段絶縁型コンバータは、エネルギーストレージシステム (ESS) では一般的なタイプのコンバータで、システムコストを削減し、電力密度を向上させます。CLLLC のゲイン曲線はより平坦になります。ただし、スイッチング周波数 (f_s) が直列共振周波数 (f_r) より高い場合、ゲイン曲線は望ましくないレベルで平坦になります。トランジストと MOSFET の寄生容量もコンバータのゲイン [1] に影響を与えます。これにより、コンバータの出力電圧がレギュレーションの範囲外になります。この Power Tip では、この非直線性を除去するため、CLLLC 制御アルゴリズムと同期整流器 (SR) により制御方式を紹介し、3.6kW のプロトタイプコンバータを使用して性能を検証します。図 1 は、住宅用 ESS のブロック図です。

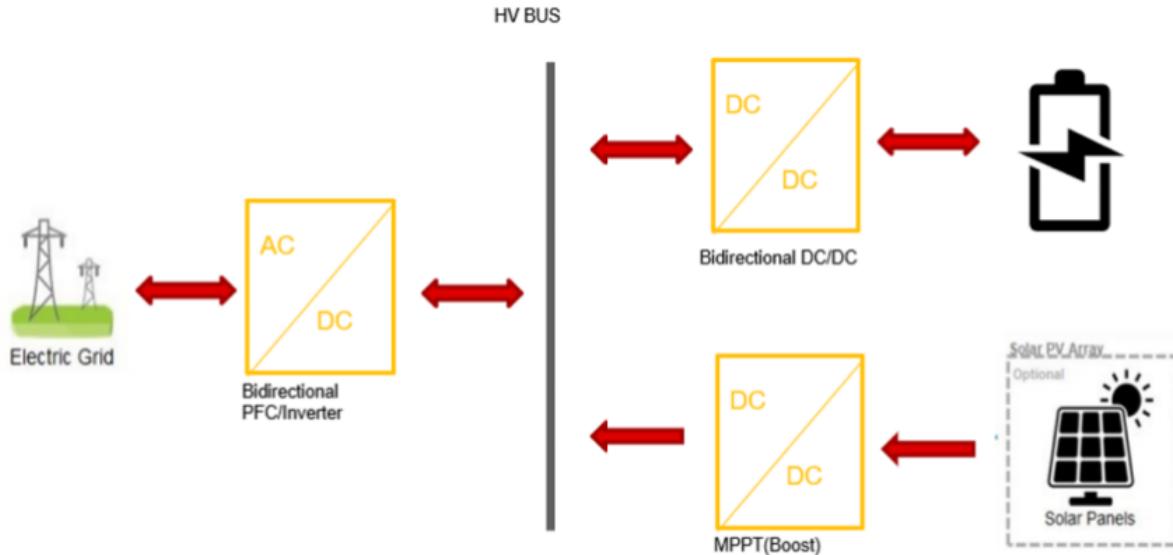


図 1. 双方向力率補正 (PFC) / インバータ、双方向 DC/DC コンバータ、最大電力点追従制御 (MPPT) を搭載した住宅用 ESS のブロック図。出典: テキサス・インスツルメンツ

ステージ制御での設計上の検討事項

図 2 に、寄生コンデンサを含むフルブリッジ CLLLC 共振コンバータの回路トポロジを示します。このトポロジは、対称型共振タンクとフルブリッジ構造で構成されています。

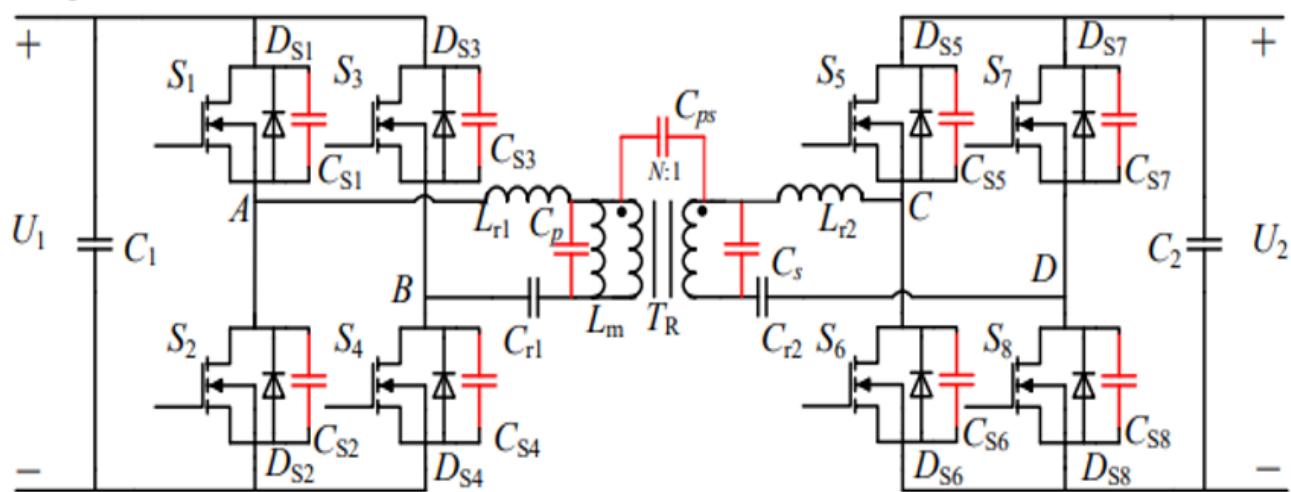


図 2. 寄生コンデンサを使用したフルブリッジ CLLLC コンバータの回路トポジ。出典:テキサス・インスツルメンツ

図 3 に、CLLCC の理想的なゲイン曲線を示します。CLLCC 共振コンバータの一般的な制御方式は、LLC コンバータと同様に可変周波数制御です。

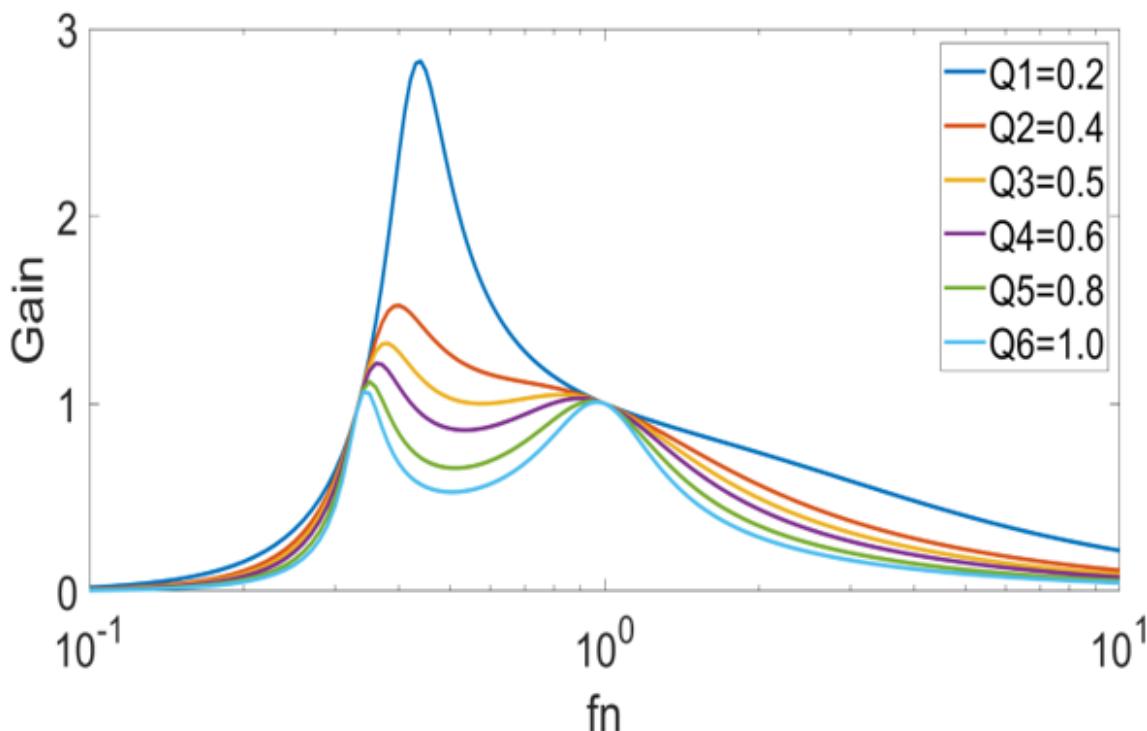


図 3. 可変周波数制御を使用する理想的な CLLLC ゲイン曲線。出典:テキサス・インスツルメンツ

前述のように、 f_s が f_r を超えた場合、ゲイン特性は平坦になります。また、電力レベルが増加すると、コンバータはバッテリ側でより多くの FET を並列接続してより大きな電流を処理する必要があります。そのため、出力フルブリッジ FET の出力キャパシタンス (C_{oss}) は非常に大きくなります。トランジスの巻線間容量と C_{oss} の寄生パラメータを考慮すると、高周波における非単調ゲイン曲線は深刻であり、これは 図 4 に示すように軽負荷条件に対応しています。

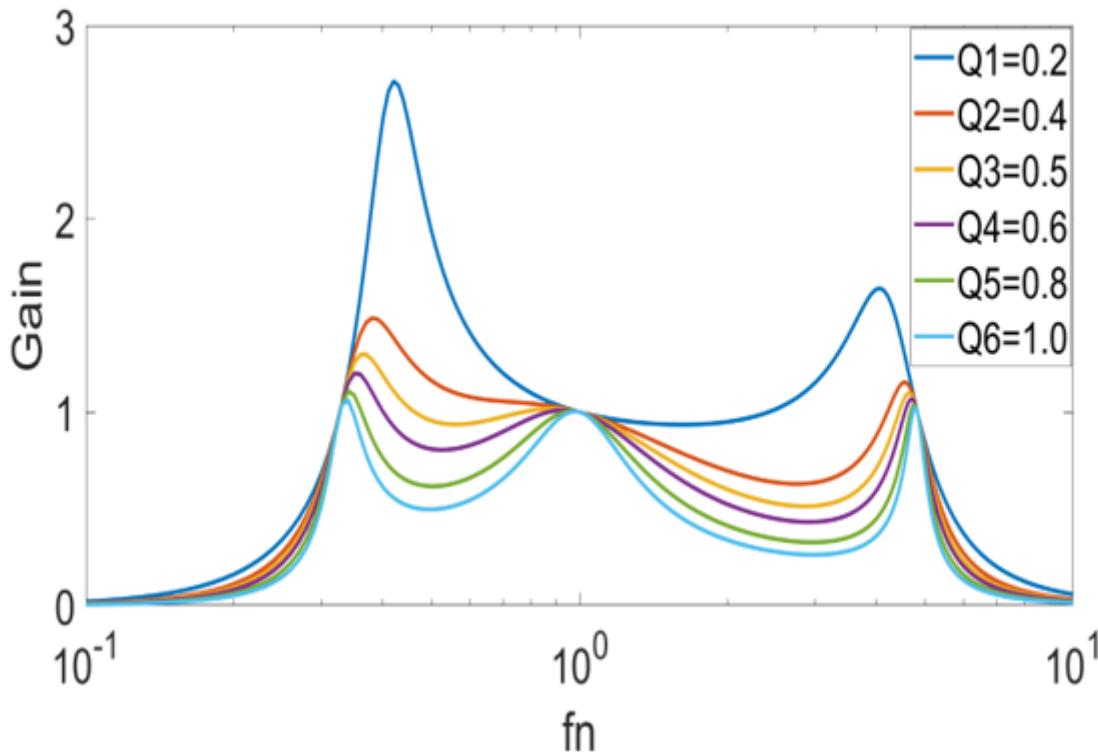


図 4. トランスの巻線間容量や C_{oss} などの寄生パラメータを考慮した CLLLC ゲイン曲線。出典: テキサス・インスツルメンツ

この場合、周波数制御は役に立ちません。Hiccup モードは CLLLC 共振コンバータの非単調機能に対処するため的一般的な方法ですが、この方法はバッテリ電圧が低いときはコンバータによって大電流を供給する必要があるため、バッテリアプリケーションには適していません。この問題は、パルス幅変調 (PWM) と位相シフト制御で解決できる可能性がありますが、PWM 制御を行うとトランジスタはハード スイッチング状態で動作するため、効率が低下し、動作周波数が制限されます。したがって、位相シフト制御の方がより適切です。

制御ロジック

図 5 に、周波数シフトと位相シフトの混合制御方式の図を示します。起動時はバッテリ電圧が低く、コンバータは高い電流スパイクを制限し、バッテリ駆動時間を延長するため、小さい充電電流でソフトスタートを行う必要があります。共振インダクタの値または周波数が十分に高くない場合、高周波からソフトスタートする効果は限定的です。バッテリが満充電に近づくと、小さな電流でトリクル充電を行い、一定の電圧を維持します。どちらの場合も、コンバータの軽負荷条件に対応しています。軽負荷時は、寄生容量の影響で出力電圧が上昇する傾向があり、過去の分析から、最終的にレギュレーションの範囲外になる可能性があります。この状態では、位相シフト制御は出力電圧を制御するのに役立ちます。コントローラの計算結果によって、コンバータが位相シフトモードに移行する必要があるかどうかを決定します。

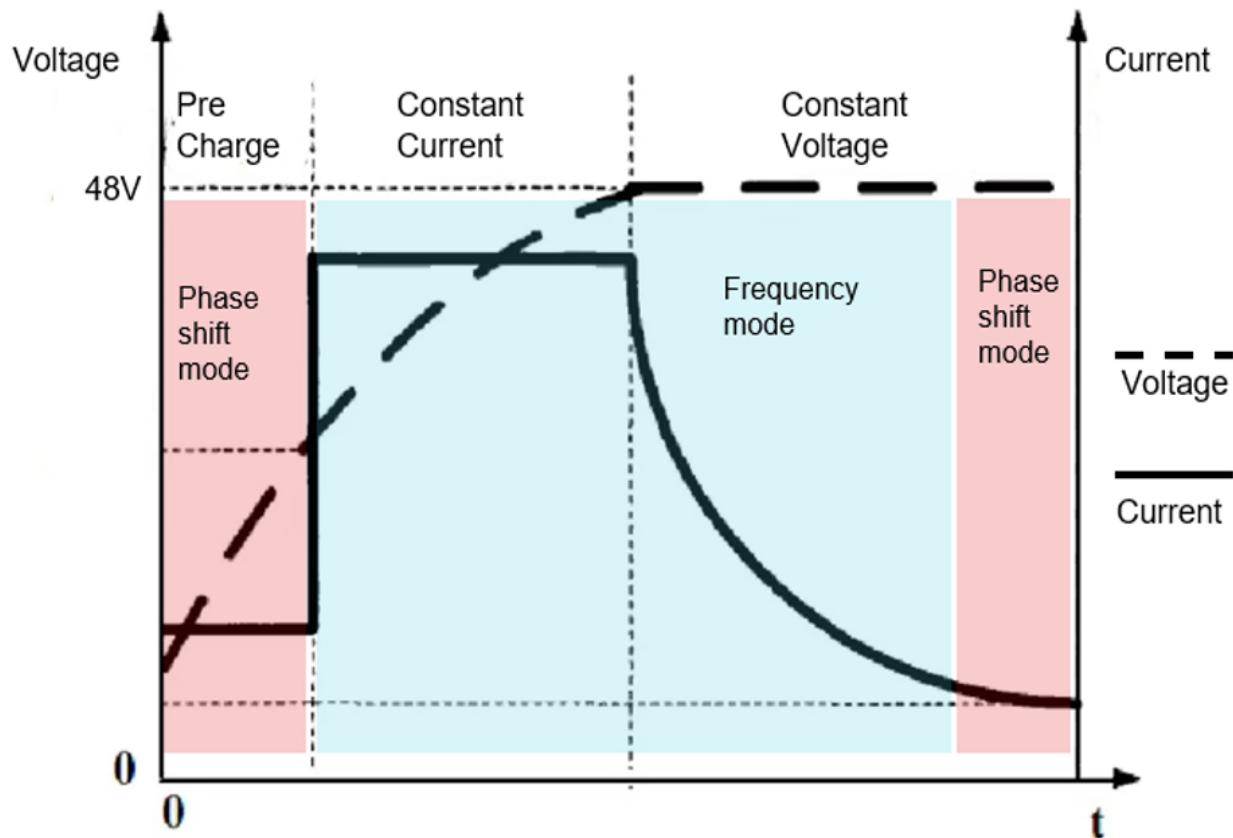


図 5. さまざまな充電状態で動作する制御方式。注:起動時はバッテリ電圧が低く、コンバータでは高い電流スパイクを制限し、バッテリ駆動時間を延長するため、小さい充電電流でソフトスタートを行う必要があります。出典:テキサス・インスツルメンツ

図 6 に、周波数シフトと位相シフトとの間の変調スイッチを示します。負荷が減少すると、出力電圧を調整するために周波数が上昇します。計算された最大周波数が設定値を超える場合、コンバータは位相シフト変調に移行します。その後、負荷が増加すると、出力電圧を調整するために位相シフト角が減少します。コンバータは、位相シフト角がゼロになると、再び周波数モードに戻ります。

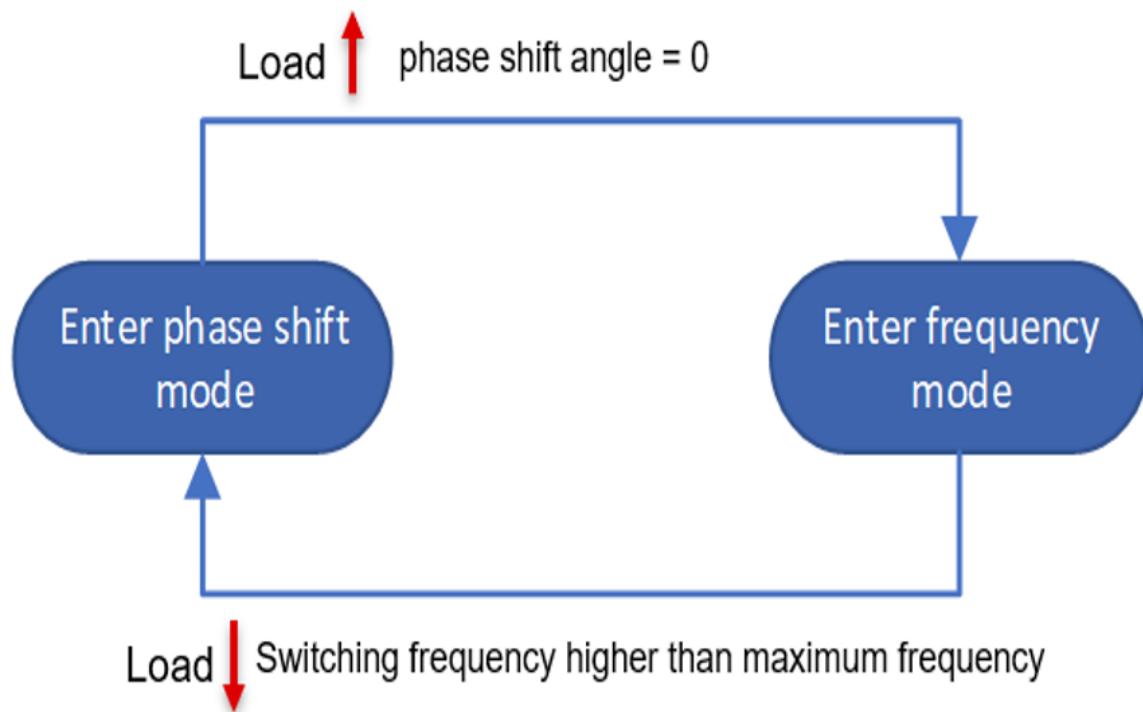


図 6. 周波数モードと位相シフトモードの間の制御方式。負荷が減少して位相シフト角がゼロになると、出力電圧を調整するために周波数が上昇します(周波数モード)。最大周波数が設定値より高い場合、出力電圧を調整するために位相シフト角が小さくなります(位相シフトモード)。出典:テキサス・インスツルメンツ

寄生容量に起因する問題

MOSFET の C_{oss} も、位相シフトモードで同様の効果があり、図 7 に示すように、これらのコンデンサと共にタンク電流が振動します。

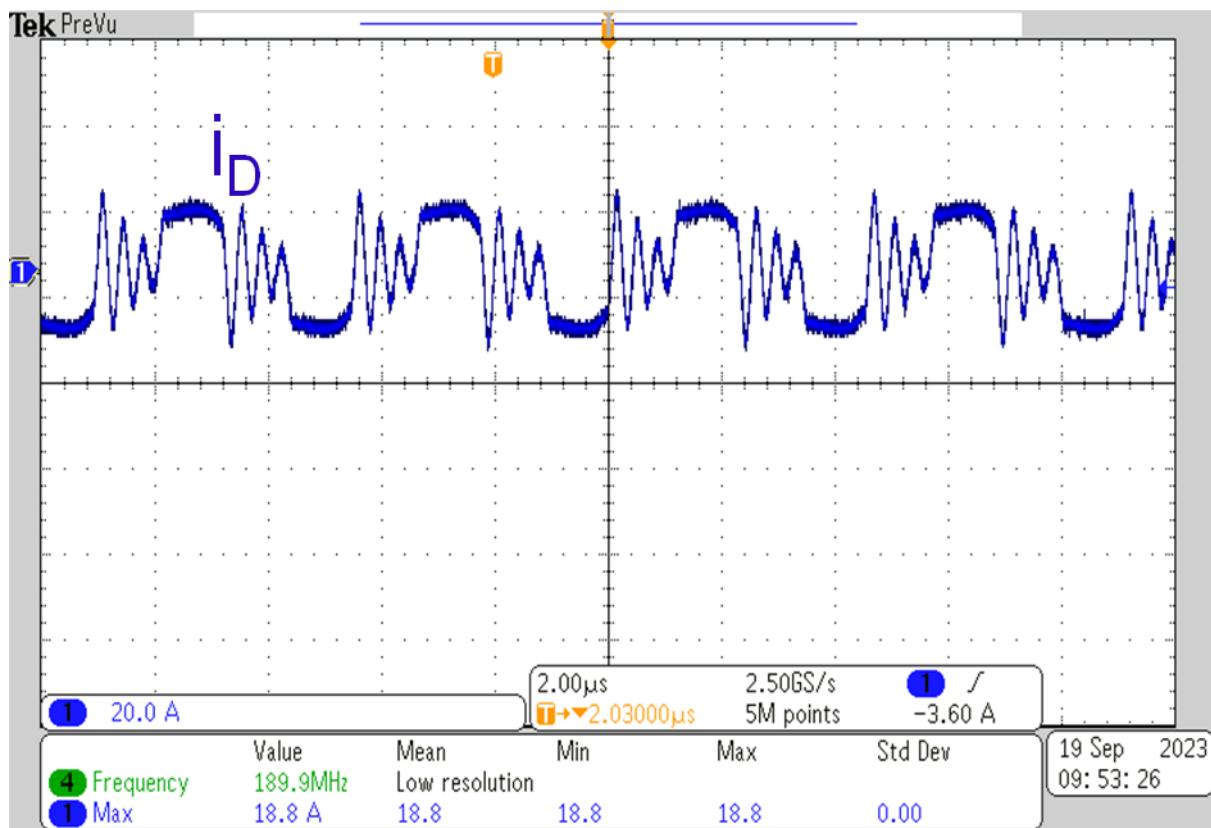


図 7. 開ループの位相シフトモードでのタンク電流波形。出典:テキサス・インスツルメンツ

図 8 に、MOSFET の C_{oss} を考慮した場合と考慮しない場合の CLLLC コンバータのゲインの比較を示します。図に示すように、ゲイン曲線に変動が生じます。この場合、コントローラが開ループ制御の下で位相シフト角度を誤った方向に調整することがあり、大きな電流スパイクが発生する場合があります。

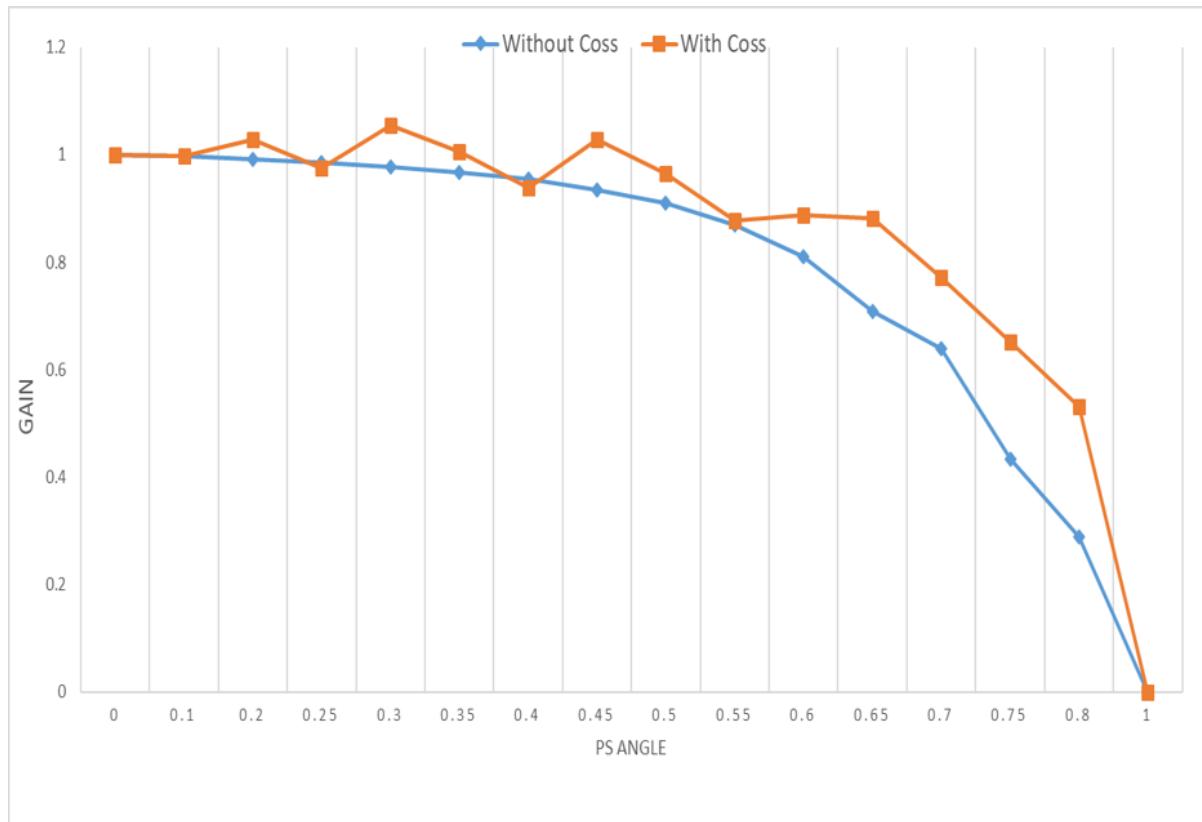


図 8. 位相シフト モードにおいて C_{oss} を使用する場合と使用しない場合のゲイン曲線。出典: テキサス・インスツルメンツ

ゲインの問題の解決

ゲインの非単調性を解消するため、図 9 に SR 制御を採用することにより、この問題を解決できる可能性があります。タンク電流の振動中に、2 つの上側 SR スイッチまたは 2 つの下側 SR スイッチを同時にオンにすると、トランジストの 2 次側巻線が一時的に短絡し、 C_{oss} が共振しなくなります。

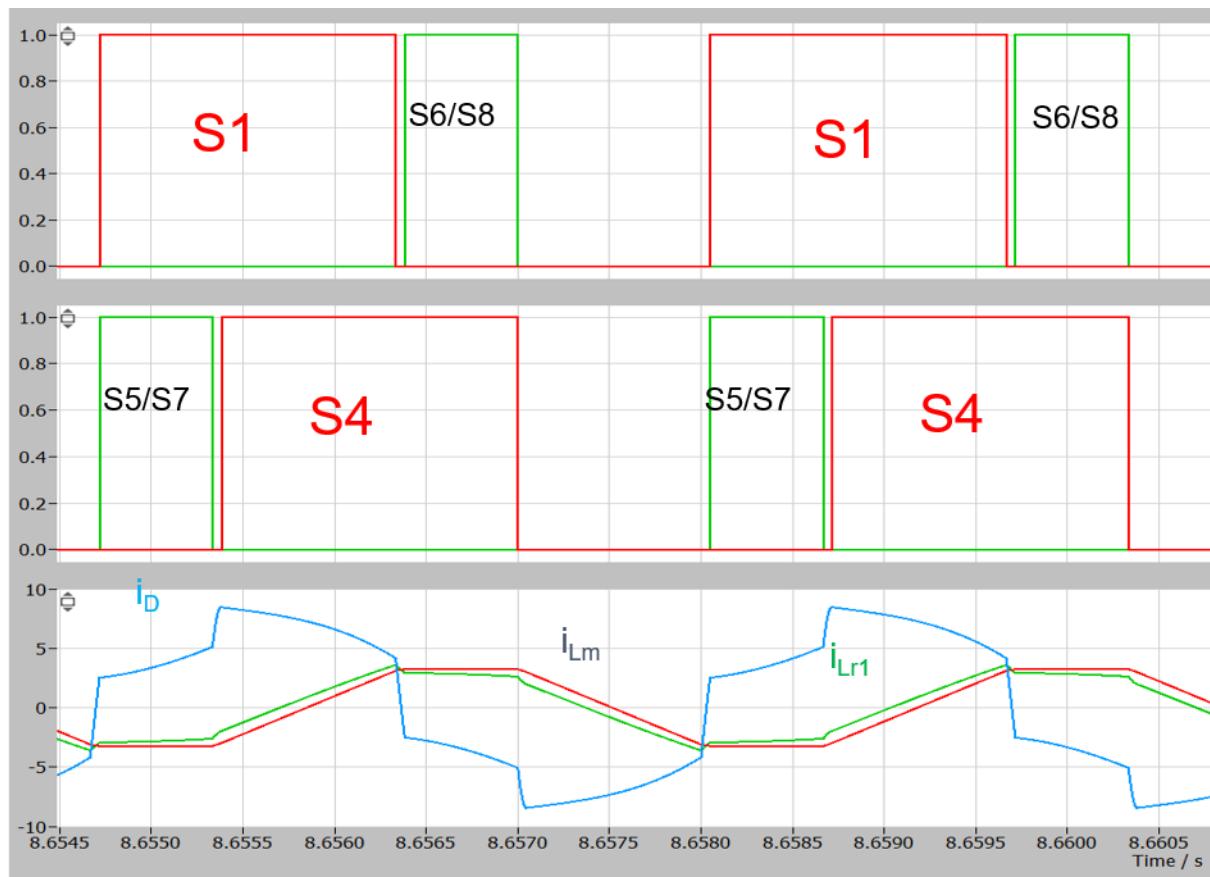


図 9. ゲインの非単調性解消のために提案されている SR 制御方式。出典: テキサス・インスツルメンツ

図 10 にテスト結果を示します。図 8 と比較して振動がありません。詳細な解析とテスト結果については、[2] を参照してください。

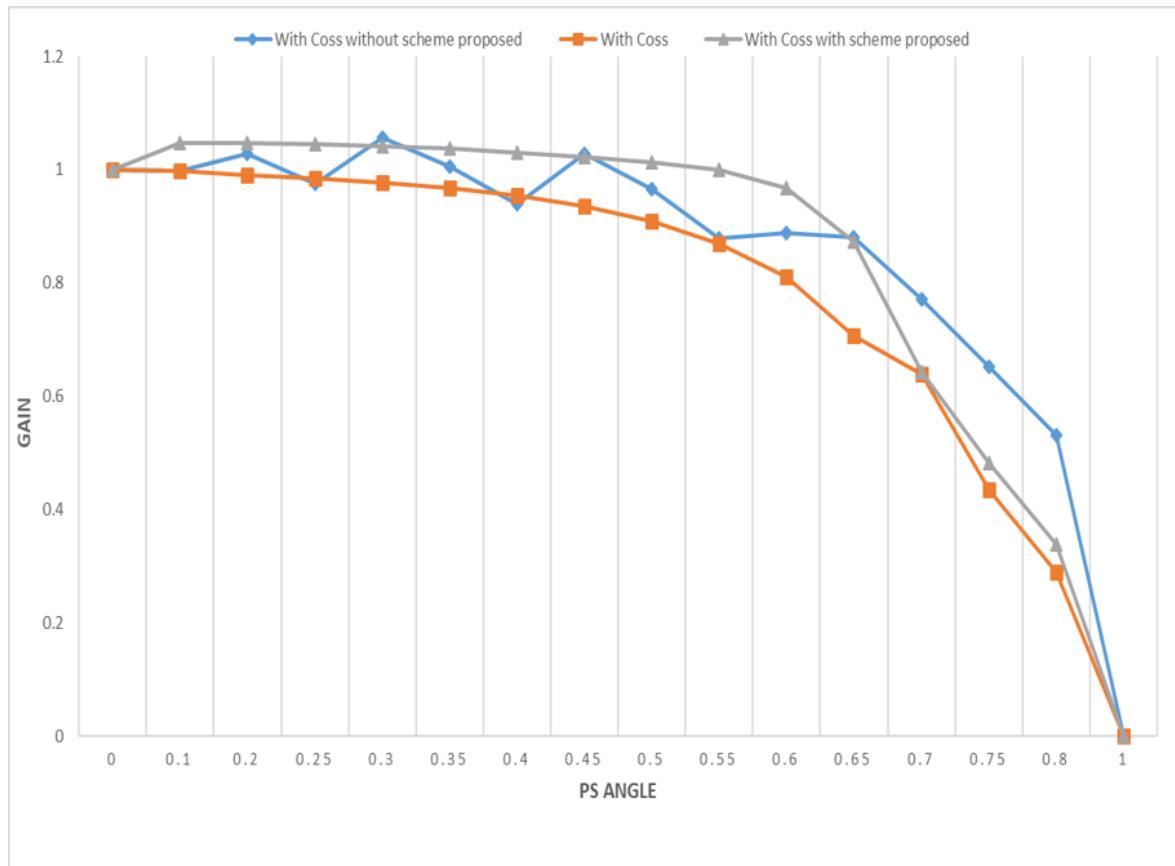


図 10. 提案された制御方式を使用した位相シフトモードでのゲイン曲線 (灰色の線)。出典: テキサス・インスツルメンツ

実験結果

プロトタイプ [3] では、この制御方式を使用してパフォーマンスを検証します。図 11 にソフトスタートの波形を示し、図 12 に、提案する制御方式を使用した位相シフトモードでのタンク電流波形を示します。

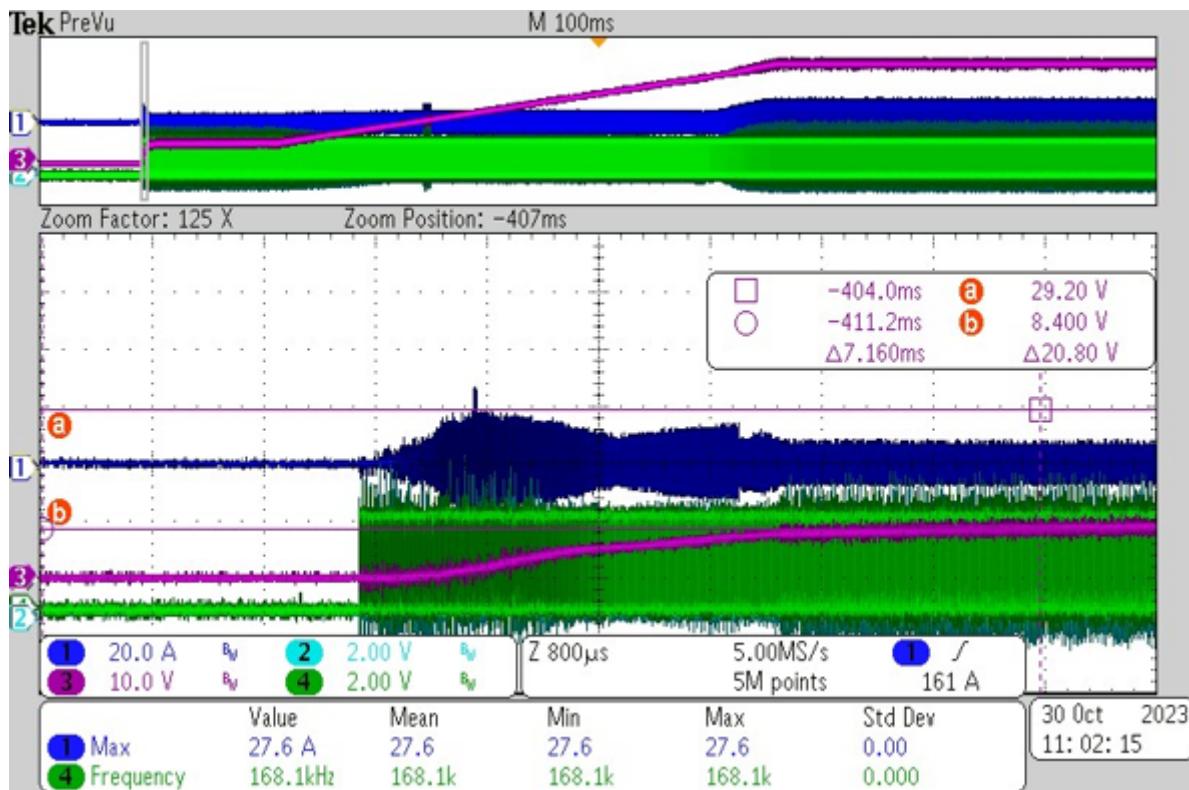


図 11. 位相シフトソフトスタートは、750W の出力電力を使用します。出典:テキサス・インスツルメンツ

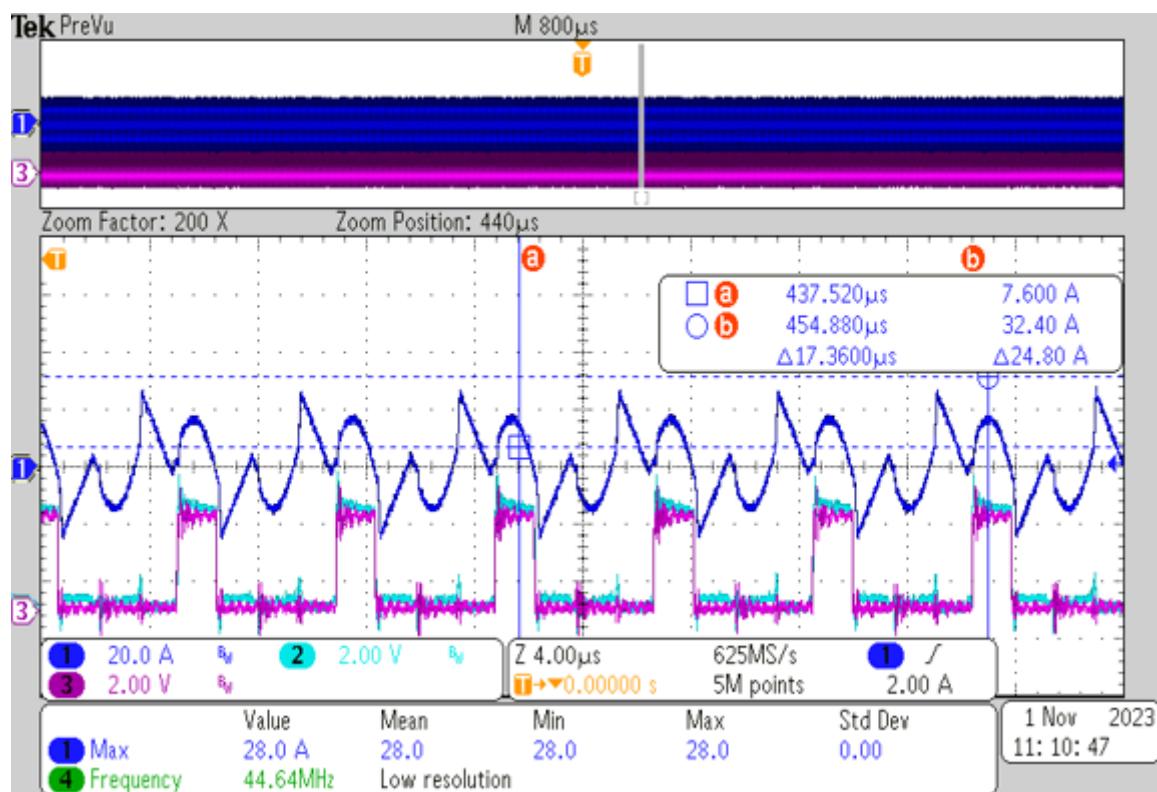


図 12. 提案された方式を使用した位相シフトモードでのタンク電流波形。出典:テキサス・インスツルメンツ

図 13 および 図 14 に、周波数/位相シフト変調スイッチのテストを示します。テスト波形から、スタートアップ電流は、出力電力 750W で 28A 以内に制限されています。タンク電流に振動はなく、コンバータは異なる動作条件でも変調をスムーズに変化させることができます。

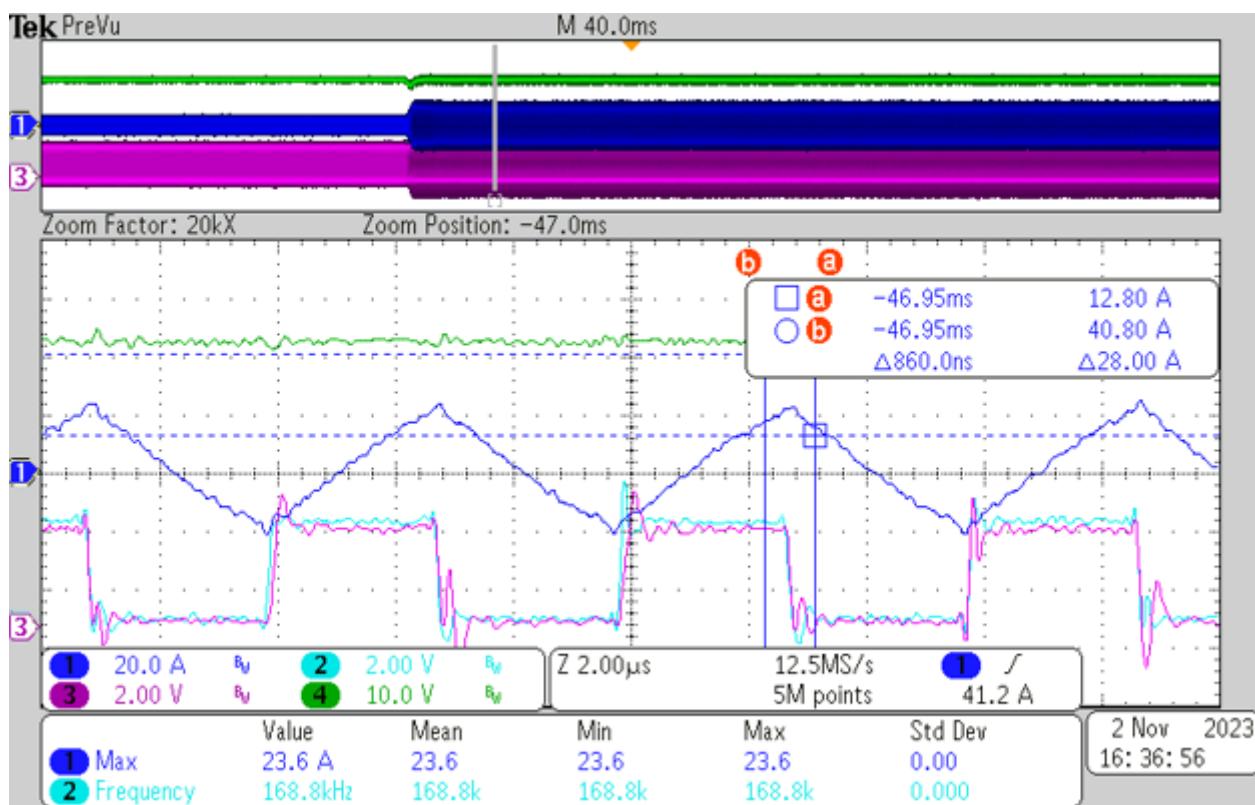


図 13. 位相シフトおよび周波数変調スイッチ: 5A 負荷を使用した周波数モード。出典: テキサス・インスツルメンツ

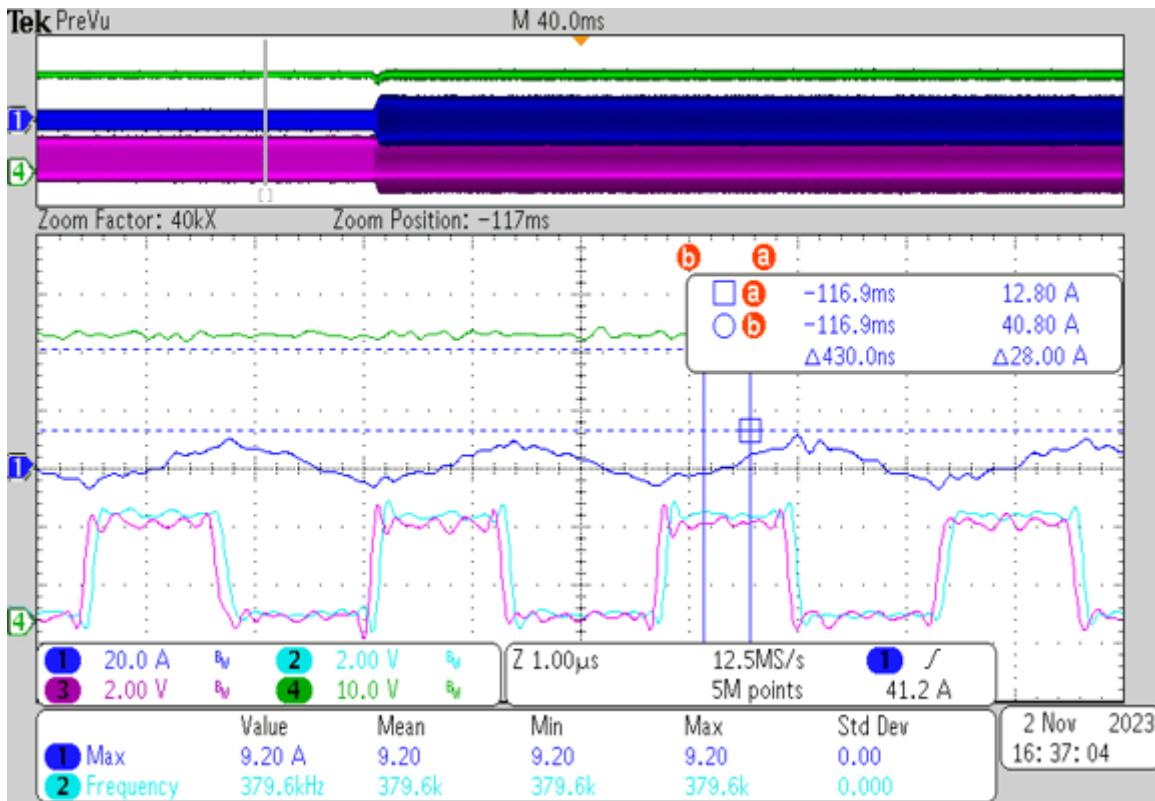


図 14. 位相シフトおよび周波数変調スイッチ:1A 負荷を使用した位相シフトモード。出典:テキサス・インスツルメンツ

まとめ

提案された周波数と位相シフトの混合制御方式により、起動段時の突入電流が制限され、軽負荷ではゲインが線形に保ちます。コンバータは、周波数変調と位相シフト変調をスムーズに切り替えることができます。また、位相シフト制御でも非単調ゲインの問題が生じ、 C_{oss} が大きい設計では電流が振動します。提案された SR 制御方法は、電流振動の問題を解決し、ゲインを単調にするのに役立ちます。

関連コンテンツ

- Power Tips #102:EV オンボード チャージャ向けの CLLLC と DAB の比較
- 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 #134:ハードなスイッチングを行わない—PWM フルブリッジで ZVS を実現
- 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 #97:『バッテリ 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 #94:上下反転型降圧を使用して非絶縁型プライバックに代わるトポロジを実現する方法

参考資料

1. Lee, Byoung-Hee, Moon-Young Kim, Chong-Eun Kim, Ki-Bum Park, および Gun-Woo Moon、「[寄生部品の影響を考慮した LLC 共振コンバータの解析](#)」INTELEC 2009 – 31st International Telecommunications Energy Conference、仁川、韓国（ソウル）、2009 年 10 月 18 ~ 22 日にて公開、pp. 1-6。
2. Tai, Will, Guangzhi Cui, および Sheng-Yang Yu、「[CLLLC 共振コンバータにおける位相シフトモードでの利得最適化制御方法](#)」PCIM Europe 2024, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management、ニュルンベルク、ドイツ, Nürnberg, Germany、2024 年 6 月 11 ~ 13 日にて公開、pp. 2513-2518.
3. Cui, Guangzhi、日付不明「[3.6kW 双方向 CLLLC 共振コンバータのリファレンス 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. PMP41042。アクセス日: 2024 年 11 月 6 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默示保証、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、明示的または默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](#) 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默示保証、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、明示的または默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 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