

Application Note

800V バッテリー アプリケーションで 650V GaN を使用する方法

Daniel Gao, Forest Fu, Gustavo Martinez

概要

車載用高電圧 (HV) から低電圧 (LV) への DC/DC アプリケーション向けに、スタックハーフブリッジ (SHB) 回路と位相シフトフルブリッジ (PSFB) に基づく新しい制御手法を採用しています。この新しいトポロジにより、高周波性能の 650V 定格スイッチを 800V のバッテリーシステムに使用できます。特別な制御方式により、SHB-PSFB は分割入力コンデンサで電圧バランスを実現し、直列スタックのスイッチが ZVS または十分な ZVS を達成して、必要な効率を維持できます。このアプリケーション ノートでは、詳細な動作原理と実験結果を解説します。

目次

1 はじめに.....	2
2 1 次側の SHB トポロジ.....	4
3 2 次側の SHB トポロジ.....	14
4 テスト結果.....	15
5 まとめ.....	18
6 参考資料.....	18
7 略称.....	18

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

EV アプリケーションでは、800V バッテリーを使用する車両ベンダーが増えています。高電圧バッテリー側では、顧客は 1200V 電源スイッチを使用する傾向がありますが、これは 650V 電源スイッチと比較して、コストが高く、 $R_{ds(on)}$ が高く、高周波性能が劣ります。800V バッテリー アプリケーションで 650V スイッチを使用する方法はあるでしょうか？

3 レベル (TL) トポロジは、800V バッテリー システムで 650V スイッチを使用できる候補のひとつです。I タイプの TL トポロジは、[図 1-1](#) および [図 1-2](#) に示されています。非絶縁型または絶縁型のどちらのシナリオでも、主要部品は 4 個のスイッチを直列接続した、2 個のクランプ ダイオードです。絶縁型 TL をたとえば、磁気素子の 1 つの端子を 4 個のスイッチの中間に、もう 1 つの端子を 2 つの直列入力コンデンサの中間に接続するなどしましょう。制御方式では、1 番目のモードでスイッチ Q1 と Q2 がオンになり、スイッチ Q3 と Q4 がオフになります。次のモードでは、スイッチ Q1 と Q2 がオフになると、Q3 と Q4 がオンになります。これら 2 つのモードは交互に繰り返されます。

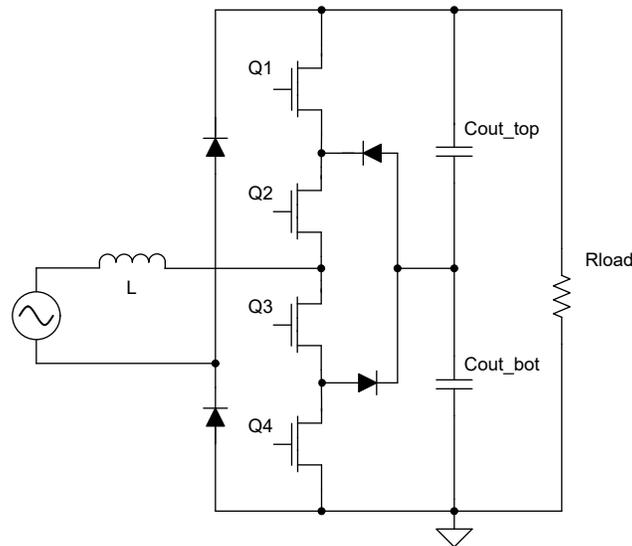


図 1-1. 非絶縁型 TL トポロジ

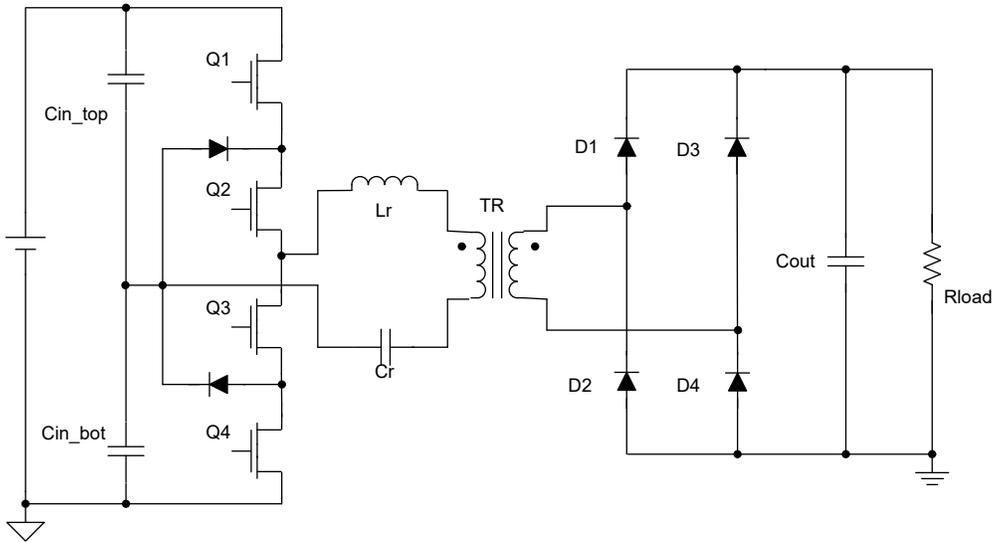


図 1-2. 絶縁型 TL トポロジ

スタック ハーフ ブリッジ (SHB) ももう 1 つのオプションです。図 1-3 が示すように、TL と SHB の間には多くの違いが見られます。SHB の場合、主な部品は 4 個の直列接続スイッチと 1 個の高電圧定格 DC ブロック コンデンサです。磁気素子の 1 つの端子は、上側の 2 つのスイッチの中央に接続します。別の端子は下側の 2 つのスイッチの中央に接続します。制御方式は、TL トポロジの方式とも異なります。

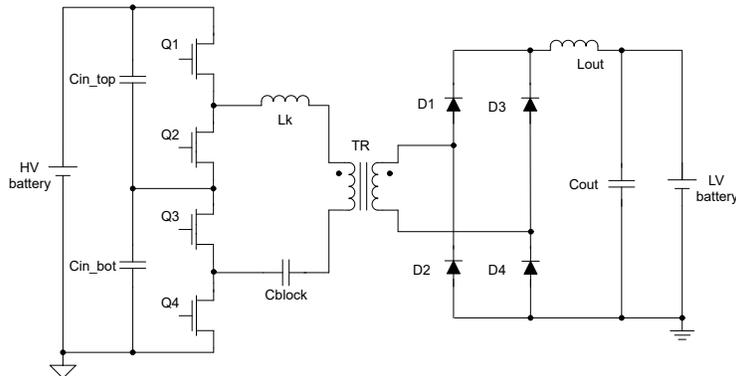


図 1-3. SHB トポロジ

高電圧から低電圧に変換する DC/DC および OBC アプリケーションでは、TL トポロジに比べてクランプ ダイオードがないため、SHB には高い電力密度が得られます。このトピックは、SHB トポロジ専用です。

2 1 次側の SHB トポロジ

図 2-1 に示すように、ステージ t_0 から t_1 まです、スイッチ Q2 と Q3 がオフの間、スイッチ Q1 と Q4 を一緒にオンにすることができます。電流は青色の矢印で示されています。ステージ $t_3 \sim t_4$ では、スイッチ Q1 と Q4 がオフになった後でスイッチ Q2 と Q3 をオンにできます。電流は緑色の矢印で示されています。ステップ $t_1 \sim t_2$ および $t_3 \sim t_4$ では、すべての MOSFET がオフになり、電流はゼロになります。

上記の制御方式では、 I_{mid} はゼロです。つまり、上側コンデンサと下側コンデンサは同時に充電と放電を行うことができます。2 個の入力コンデンサの中間電圧は、入力電圧の半分になります。この制御方式はハードスイッチハーフブリッジ (HSFB)、LLC、単相シフトデュアルアクティブブリッジ (SPSDAB) 用に設計されていますが、位相シフトハーフブリッジ (PSFB) は用ではありません。位相シフト制御の場合、かなり複雑になることがわかります。これについては、次のセクションで詳しく説明します。

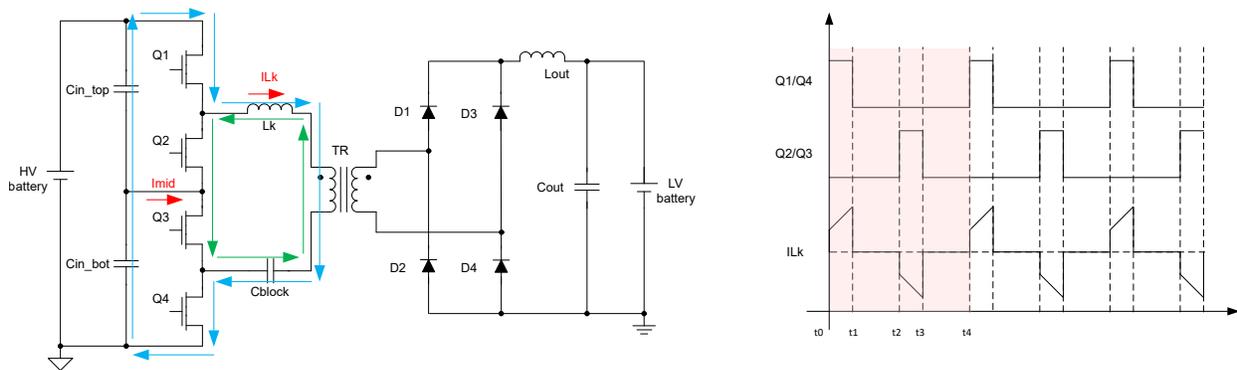


図 2-1. SHB トポロジと制御方式

図 2-2 に、HSFB SHB 制御の Simplis シミュレーション結果を示します。 V_{mid} は入力直列コンデンサの中間電圧で、 I_{mid} は電流が中間点に入り、出力されます。 I_{mid} はタイムゾーンまでゼロのままなので、ここでは中間電圧バランスの問題 (MVBI) はありません。ブロックコンデンサの DC バイアス電圧のが入力電圧の半分であることを確認します。

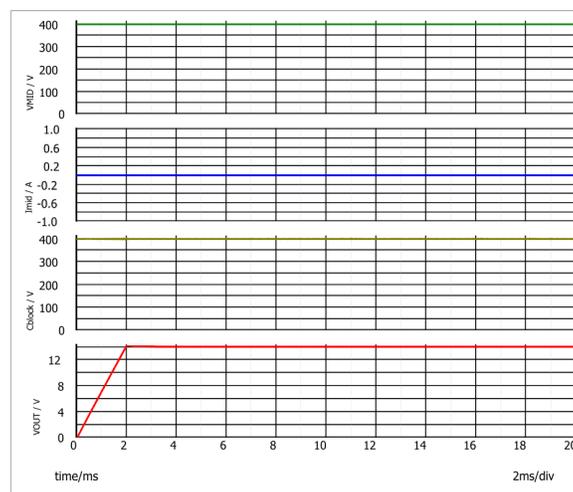


図 2-2. HSFB SHB 制御のシミュレーション結果

オリジナルの PSFB 制御方式では、図 2-3 に示すように、2 つの直列入力コンデンサの中間電圧が不平衡になる可能性があります。これは、各入力コンデンサの電圧が $V_{in}/2$ ではないことを意味します。その主な理由は、1 次側のサークル電流により、別のコンデンサがバランスしている間も 1 つのコンデンサの放電を継続できることです。

ここで、上側 2 個のスイッチの電圧ストレスは、上側のコンデンサまで達します。下側の 2 つのスイッチの電圧ストレスは下側のコンデンサまでになります。

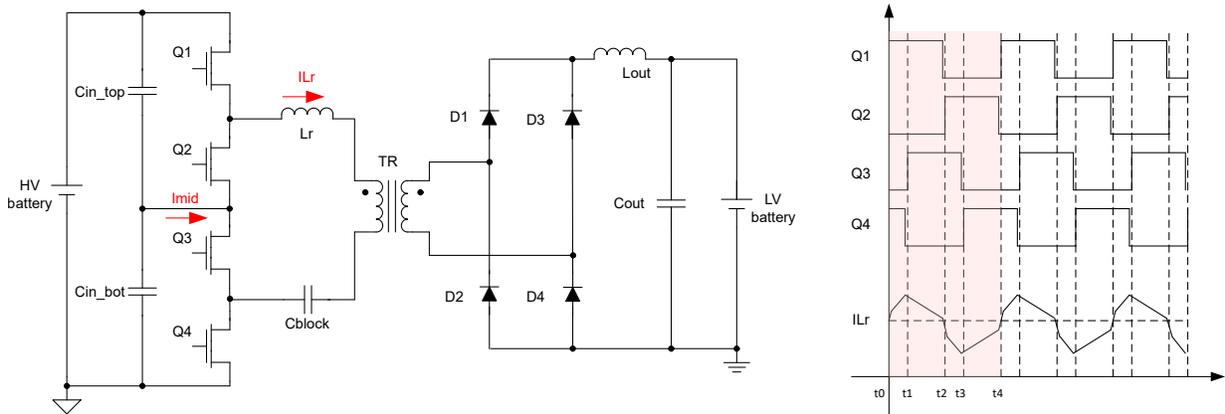


図 2-3. オリジナルの制御方式による PSFB SHB 制御

図 2-4 に示すシミュレーション結果から、定常状態で V_{mid} は最終的に安定した値を得ることができます。安定値は負荷によって異なります。負荷が大きいほど、 C_{in_top} と C_{in_bot} の電圧振動が大きくなります。OCP や短絡などの特定の過渡条件では、中間電圧が非常に大きく (または非常に小さい)、スイッチの障害につながる可能性があります。これが、ユーザーが MVBI に注意を払わなければならない理由です。

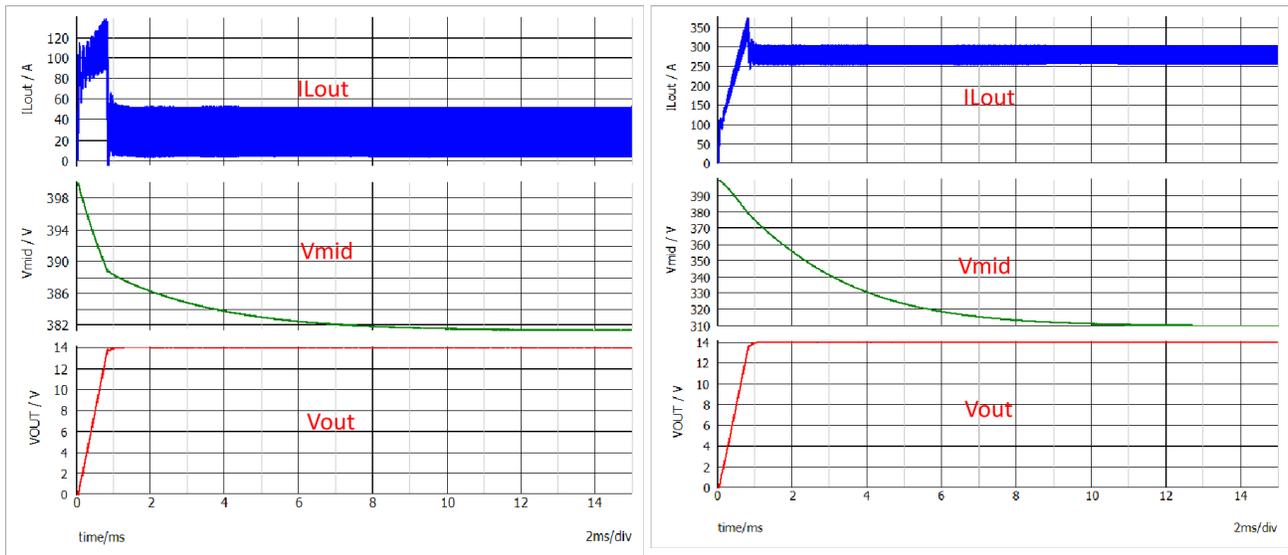


図 2-4. オリジナル制御方式による PSFB SHB のシミュレーション結果

図 2-5 および 図 2-9 に、中電圧バランスの問題の根本原因を示します。

ステージ T0 ~ T1、Q1 と Q4 がオン、Q2 と Q3 がオフの場合、電流のフローパスは青い矢印に示ようになります。Imid への電流の流入または流出はできません。Cin_top と Cin_bot は放電しています。

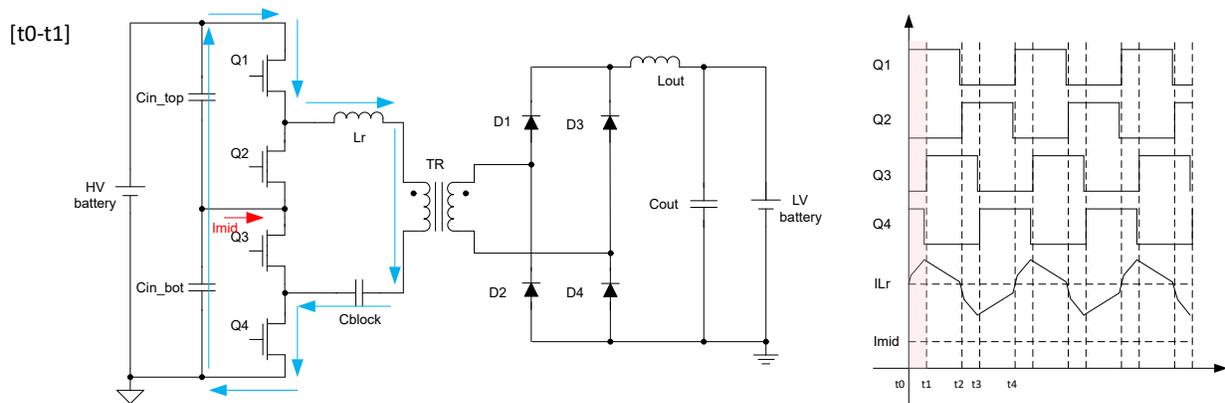


図 2-5. オリジナル制御方式の PSFB SHB のステージ (T0, T1)

ステージ T1 ~ T2, Q1 と Q2 がオン、Q3 と Q4 がオフの場合、電流のフローパスは青い矢印に示すようになります。負の I_{mid} が発生します。Cin_top はまだ放電中です。

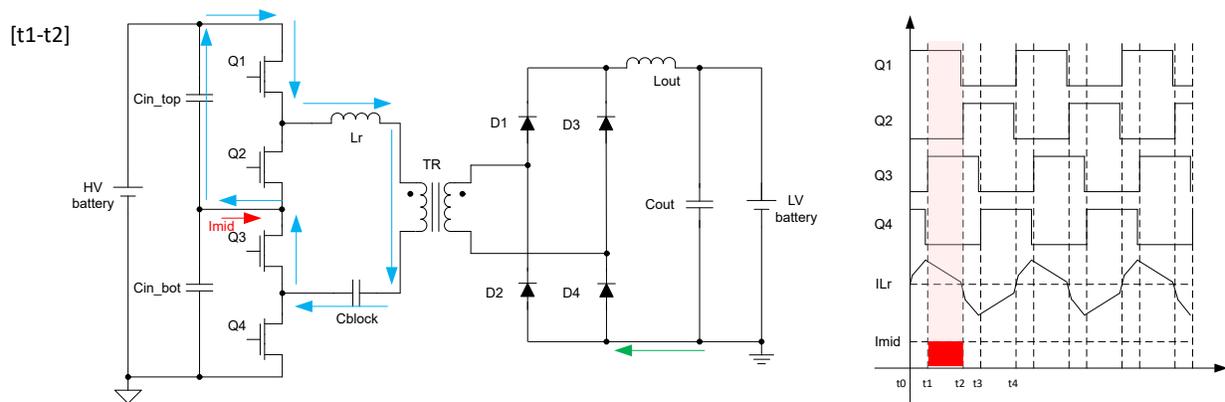


図 2-6. オリジナル制御方式の PSFB SHB のステージ (T1, T2)

ステージ T2 ~ T3, Q2 と Q3 がオン、Q1 と Q4 がオフの場合、電流のフローパスは青い矢印に示すようになります。Imid への電流の流入または流出はできません。

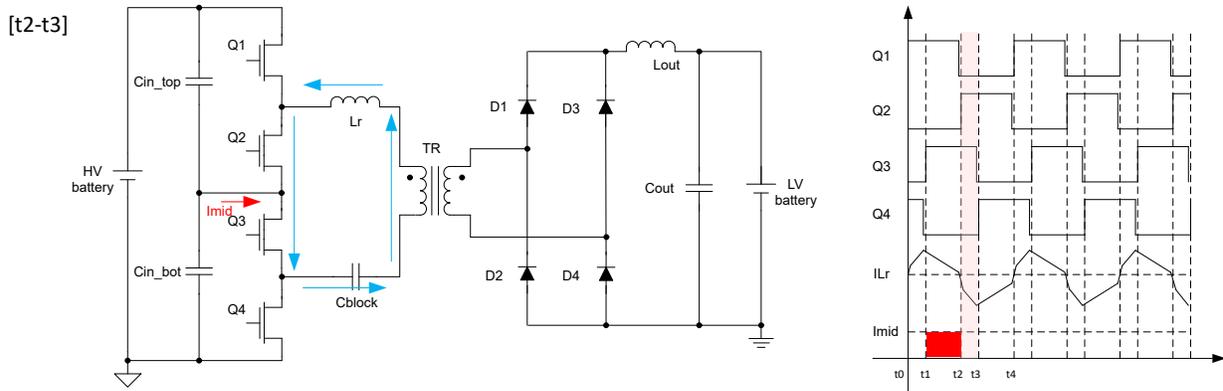


図 2-7. オリジナル制御方式の PSFB SHB のステージ (T2、T3)

ステージ T3 ~ T4、Q2 と Q4 がオン、Q1 と Q3 がオフの場合、電流のフローパスは青い矢印に示すようになります。ここでも負の Imid が発生します。Cin_bot は充電中です。

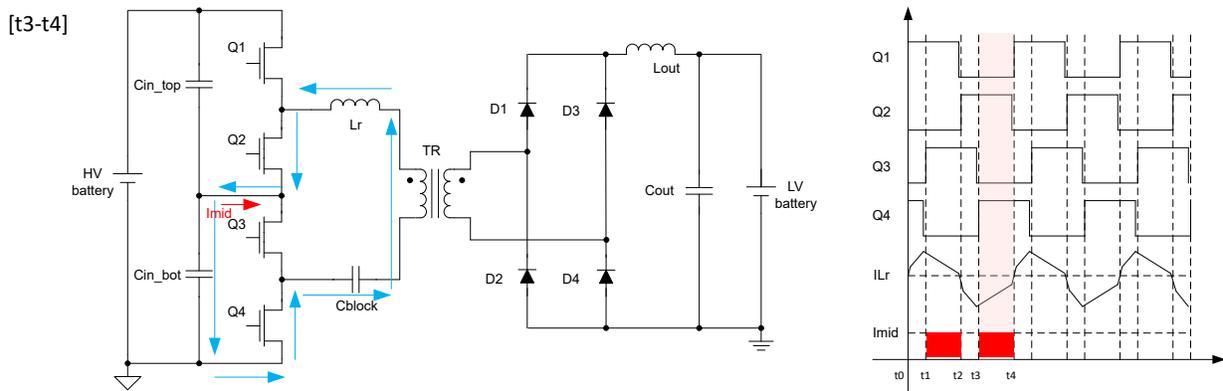


図 2-8. オリジナル制御方式の PSFB SHB のステージ (T3、T4)

Imid は 4 ステージで同じ方向を維持するため、Cin_top は常に放電し、Cin_bot は充電と放電をそれぞれ 1 回ずつ行います。そのため、中電圧バランスの問題が発生します。振動電圧は 式 1 を使用して計算できます。これは Iout に比例します。

$$V_{bri} = (2 \times L_r \times ((I_{out} + 0.5 \times \Delta I_L) / N_{ps})) / T_{off} \quad (1)$$

ここで Toff は、半周期におけるサイクル電流時間です。

Nps はトランスの巻線比です

ΔIL は出力チョークのリプル電流です

根本的な原因は、サイクル電流に関連しています。これを修正する方法は？ 基本的な考え方は、Cin_top または Cin_bot は等しくなる可能性があるということです。つまり、1 回のスイッチング周期で Imid を中和する必要があります。

図 2-9 に、実行可能なひとつのプランを提案します。ピンク色でマークされた最初の半周期では、Imid は Cin_top を 2 回通過でき、青色でマークされた別の半周期では、Imid も Cin_bot を 2 回通過できます。各半サイクルで、Imid の方向は反転する可能性があります。Cin_top または Cin_bot は 1 回充電し、1 回放電することができます。したがって、入力コンデンサの中間電圧は平衡型です。

次のセクションでは、[図 2-9](#) から [図 2-17](#) までの各手順の詳細を示します。

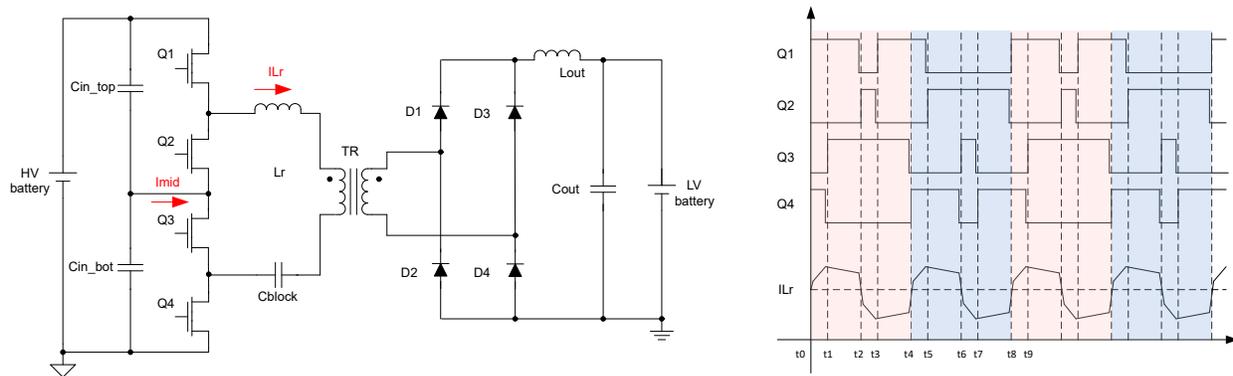


図 2-9. 提案制御付き PSFB SHB

T0 ~ T1 のステージでは、Q1 と Q4 がオンになり、Q2 と Q3 がオフになります。現在のフローパスは青色の矢印で示されています。Imid への電流の流入または流出はできません。Cin_top と Cin_bot は放電しています。

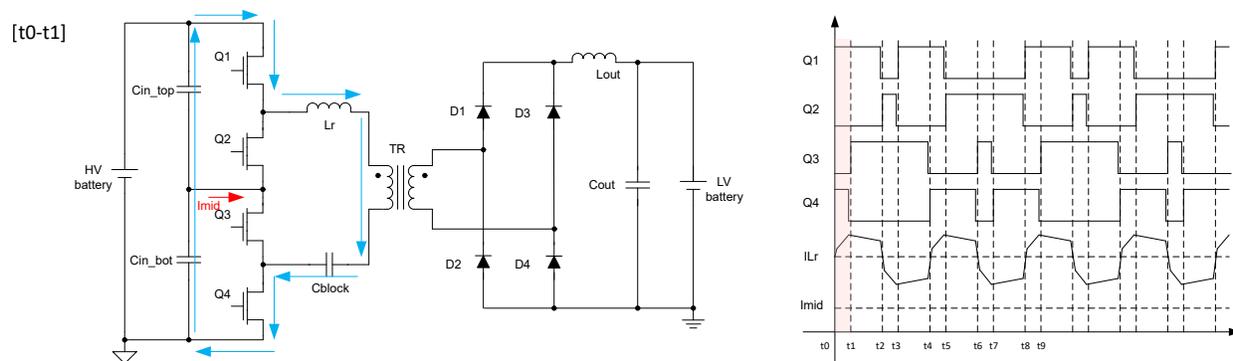


図 2-10. 提案制御による PSFB のステージ (T0, T1)

ステージ T1 ~ T2、Q1 と Q2 がオン、Q3 と Q4 がオフの場合、電流のフローパスは青い矢印に示すようになります。負の Imid が発生します。Cin_top はまだ放電中です。

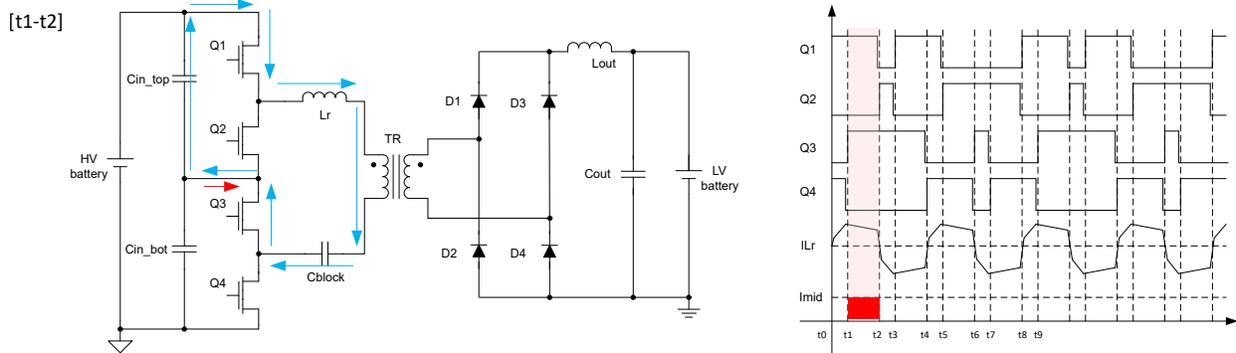


図 2-11. 提案制御による PSFB SHB のステージ (T1, T2)

ステージ T2 ~ T3, Q2 と Q3 がオン、Q1 と Q4 がオフの場合、電流のフローパスは青い矢印に示すようになります。Imid への電流の流入または流出はできません。

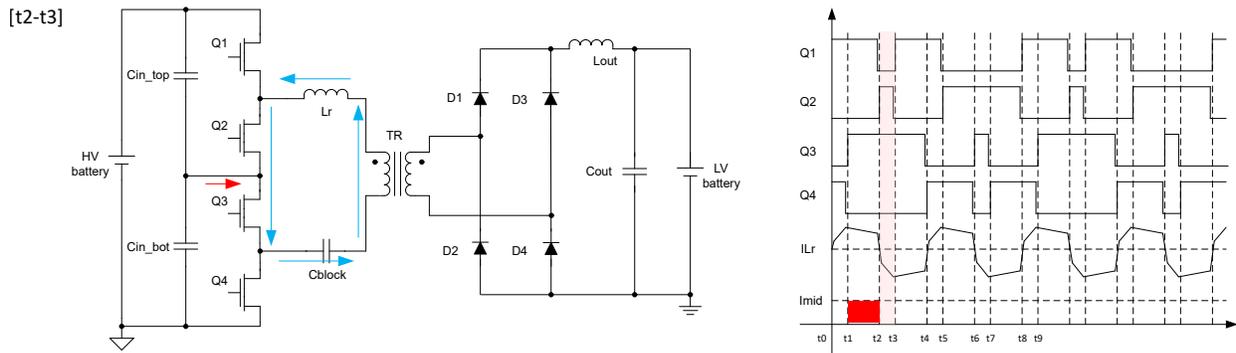


図 2-12. 提案制御による PSFB SHB のステージ (T2, T3)

ステージ T3 ~ T4, Q2 と Q4 がオン、Q1 と Q3 がオフの場合、電流のフローパスは青い矢印に示すようになります。正の Imid。Cin_top は充電中です。

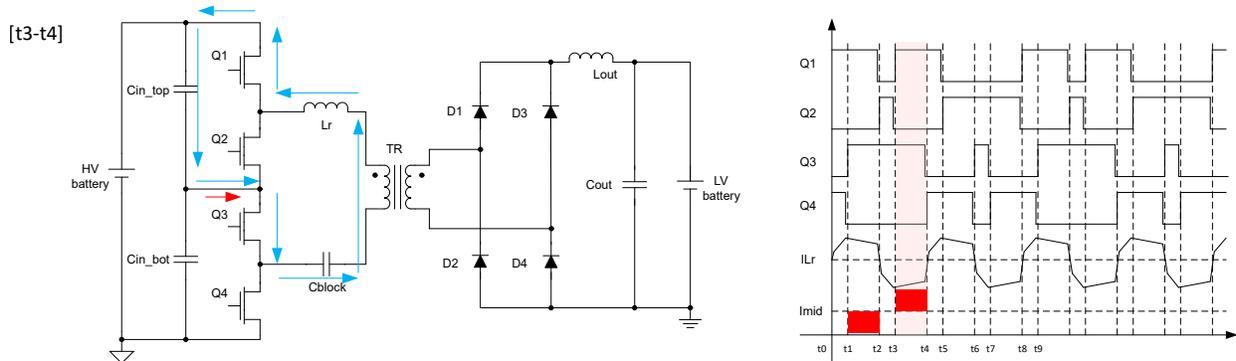


図 2-13. 提案制御による PSFB SHB のステージ (T3 ~ T4)

最初の半サイクルでは、Imid は Cin_top を逆方向に 2 回流れるため、Cin_top の電圧は元の値とほぼ同じになります。

ステージ T4 ~ T5、Q1 と Q4 がオン、Q2 と Q3 がオフの場合、電流のフローパスは青い矢印に示すようになります。Imid への電流の流入または流出はできません。Cin_top と Cin_bot は放電しています。

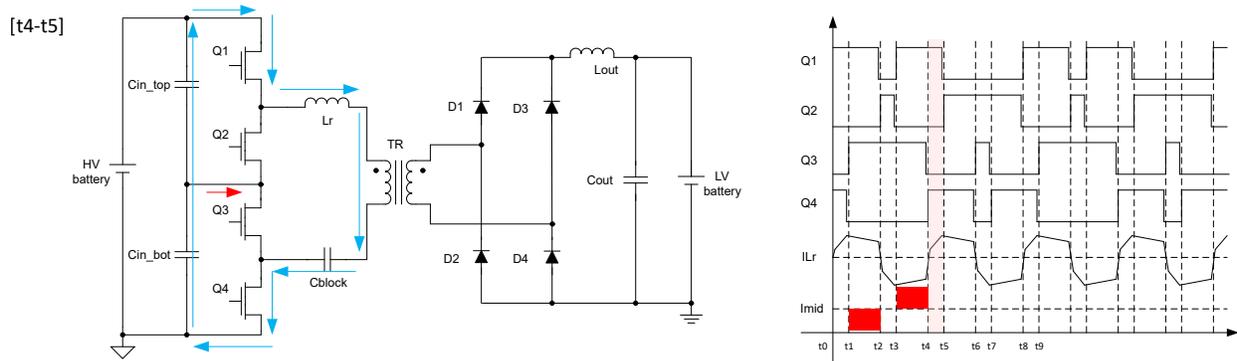


図 2-14. 提案制御による PSFB SHB のステージ (T4、T5)

ステージ T5 ~ T6、Q2 と Q4 がオン、Q1 と Q3 がオフの場合、電流のフローパスは青い矢印に示すようになります。正の Imid が発生します。Cin_bot はまだ放電中です。

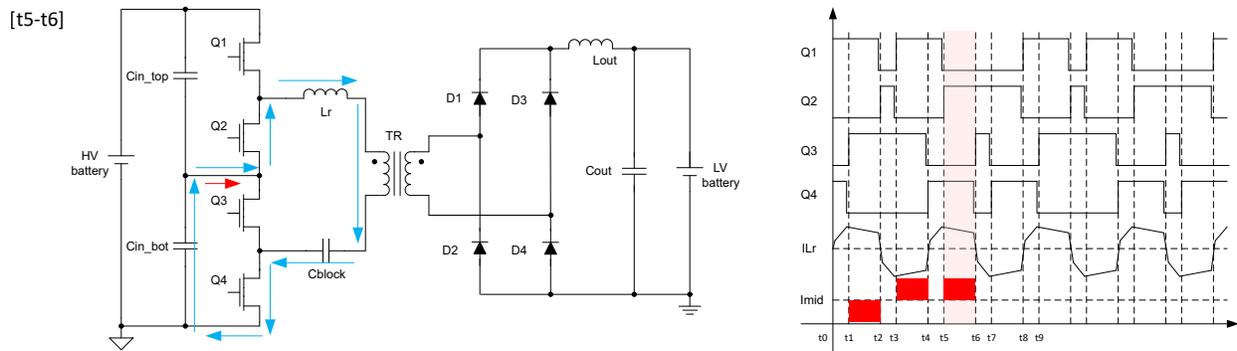


図 2-15. 提案制御による PSFB SHB のステージ (T5、T6)

ステージ T6 ~ T7、Q2 と Q3 がオン、Q1 と Q4 がオフの場合、電流のフローパスは青い矢印に示すようになります。Imid への電流の流入または流出はできません。

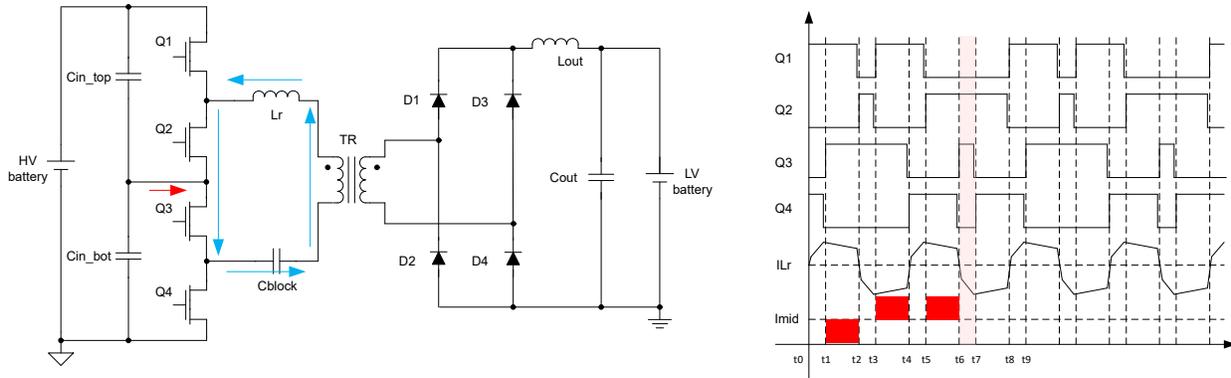


図 2-16. 提案制御による PSFB SHB のステージ (T6, T7)

ステージ T7 ~ T8、Q2 と Q4 がオン、Q1 と Q3 がオフの場合、電流のフローパスは青い矢印に示すようになります。負の I_{mid} 。Cin_bot は充電中です。

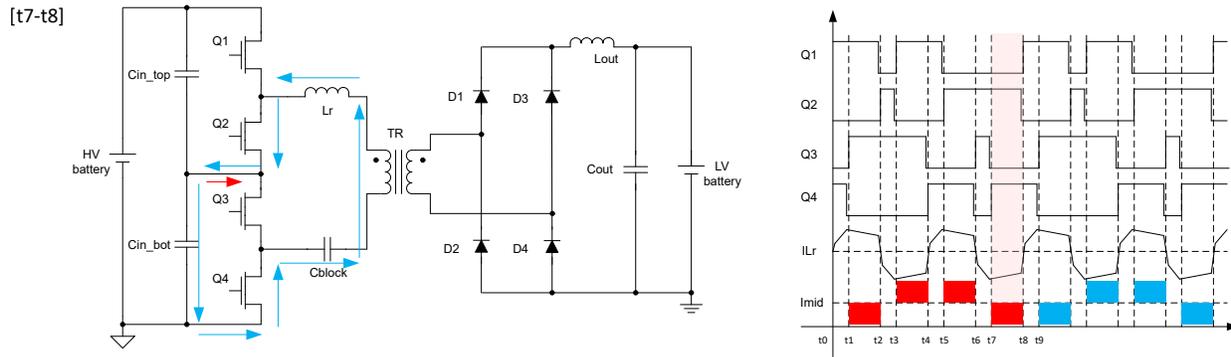


図 2-17. 提案制御による PSFB SHB のステージ (T7, T8)

サイクルの後半では、 I_{mid} は Cin_bot を逆方向に 2 回流れるため、Cin_bot の電圧は $V_{in}/2$ を維持します。

この設計は、中電圧バランスの問題を解決します。ただし、PWM はかなり複雑で、1 サイクルで 2 つのパルスが必要です。ほとんどのマイコンデバイスでは、この機能を実現できません。TI の新世代 C2000 デバイスは、8 つの拡張比較レジスタを持つ Type-5 ePWM 機能を提案しています。1 つの PWM 周期内に単一のパルスを生成する代わりに、1 つの PWM 周期内に最大 4 つのパルスを生成できます。

ただし、Type-5 機能はすべての C2000 デバイスでサポートされているわけではないことに注意してください。タイプ 5 ではアップモードのみ使用できます。F28P65X シリーズは、このアプリケーションノートで使用されています。

図 2-18 に、1 つの PWM 周期で 2 つのパルスを生成する例を示します。XCMP1-4 を CMPA に、XCMP5-8 を CMPB に割り当てることで、ユーザーは 1 つの PWM 周期で 2 つのパルスを持つ 2 つの独立した PWM を取得できます。

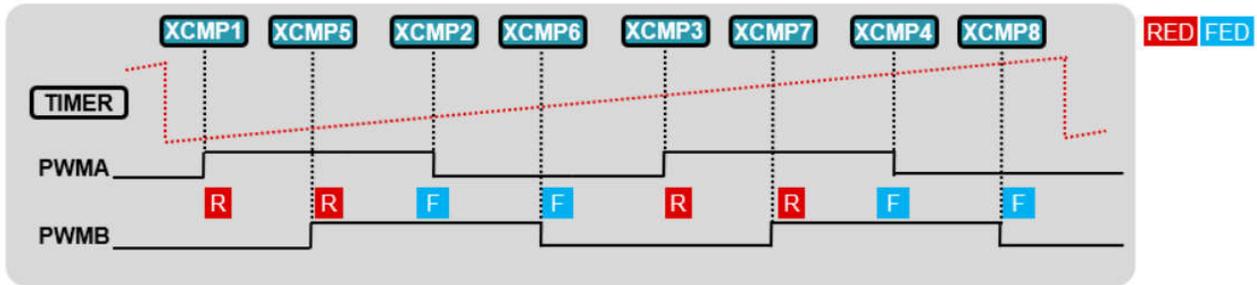


図 2-18. タイプ 5 を使用して、1 周期で 2 つのパルスを生成します

PMP41139 の設計上のスイッチング周波数は 200kHz ですが、共振タンク内の電流が 2 回サイクルされる可能性があるため、時間ベースクロック (TBCLK) を 100kHz に設定できます。図 2-19 は、提案制御方式のタイプ 5 ePWM 構成を示しています。

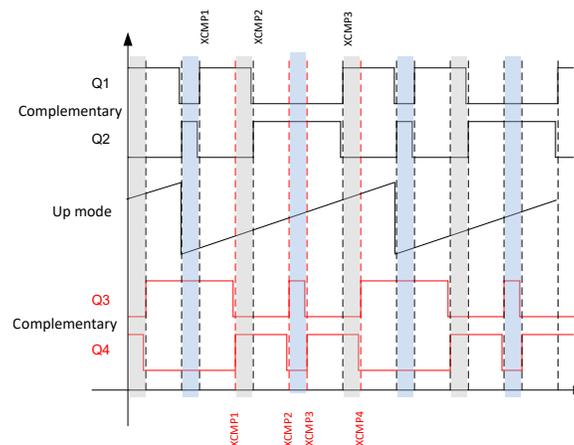


図 2-19. 制御方法が提案された PSFB SHB 用タイプ 5 EPWM セットアップ

Q1 と Q2 は相補的です。XCMP1-3 を Q1 に設定します。

Q3 と Q4 は相補的です。XCMP1-4 を Q3 に設定します。

タイプ 5 を使用する場合、PWM のいくつかの XCMP 値を更新する必要があります。同じ PWM を実現するシンプルな方法はあるでしょうか？タイプ 4 は使用できますか？

答えは「はい」です。図 2-20 に示すように、ピンク色の領域と青色の領域は軸対称になります。ピンク色の領域では、Q1 を取得するために CMPA と CMPB のみを設定し、青色の領域で CMPA と CMPB の値を交換して Q1 を取得する必要があります。

PMP41139 では、この方式を使用して、目的の PWM を出力します。

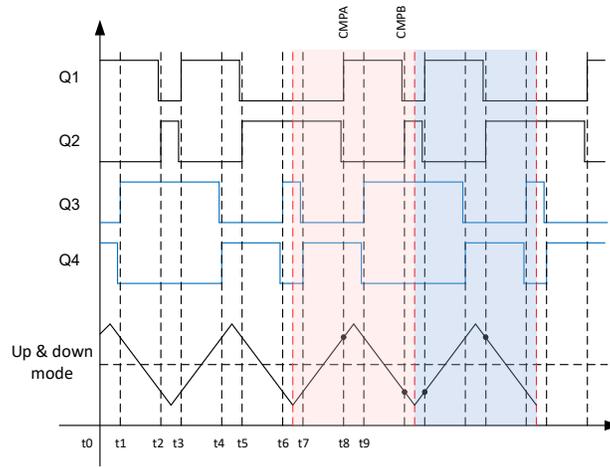


図 2-20. 制御方法が提案された PSFB SHB 用タイプ 4 EPWM セットアップ

3 2 次側の SHB トポロジ

すでに説明した SHB の設計は 1 次側にあります。この場所を 2 次側に移動することもできます。主な部品、接続、制御方式は位相シフトなしの 1 次側と同じです。

図 3-1 に、CLLLC トポロジで SHB を同期整流器として使用する例を示します。Q5 と Q8 が同時にオンになり、Q6 と Q7 が同時にオンになります。Imid 電流フローはなく、中電圧バランスの問題はありません。

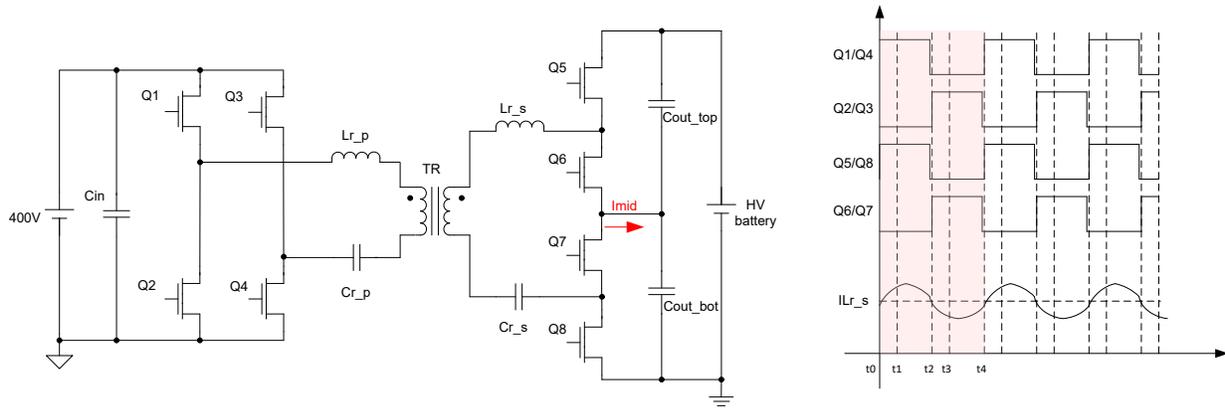


図 3-1. 2 次側の SHB トポロジと制御方式

図 3-2 のシミュレーションの結果は、前述の観点を証明しています。

- 赤色: 出力電圧
- 緑色: 中電圧
- 青色: 共振コンデンサの電圧

共振コンデンサには 1/2 V_{out} の DC バイアス電圧があることに注意してください。

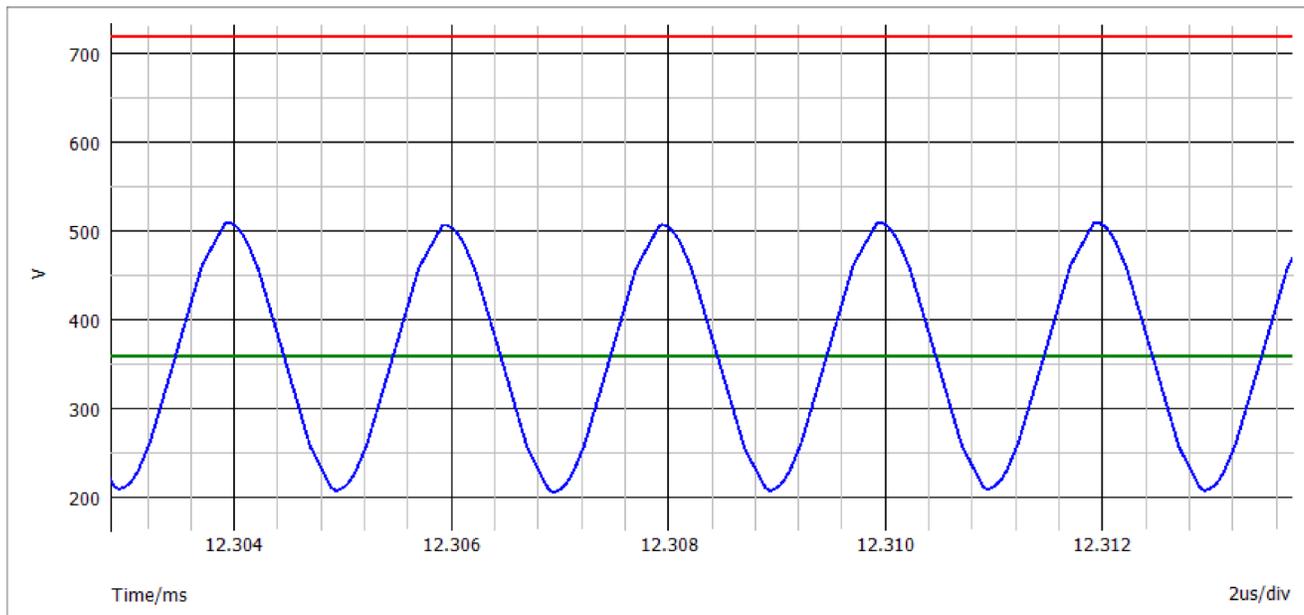


図 3-2. CLLC SHB SR 制御のシミュレーション結果

4 テスト結果

PMP41139 は車載対応 3.5kW 800V ~ 14V DC/DC コンバータのリファレンス デザインで、[図 4-1](#) に示すように、プライマリスイッチ Q1 ~ Q4 として 650V 定格の GaN デバイス LMG3522R030-Q1 を使用しています。入力電圧の範囲は 400V ~ 900V です。[表 4-1](#) は、制御の有無にかかわらず差動値を示しています。テスト条件は 400V_{in}、13.5V_{out}、100A の負荷です。提案制御方式では、電圧不平衡は 28V から 2V に減少します。中間電圧バランス問題の改善は [図 4-2](#) に示されています。

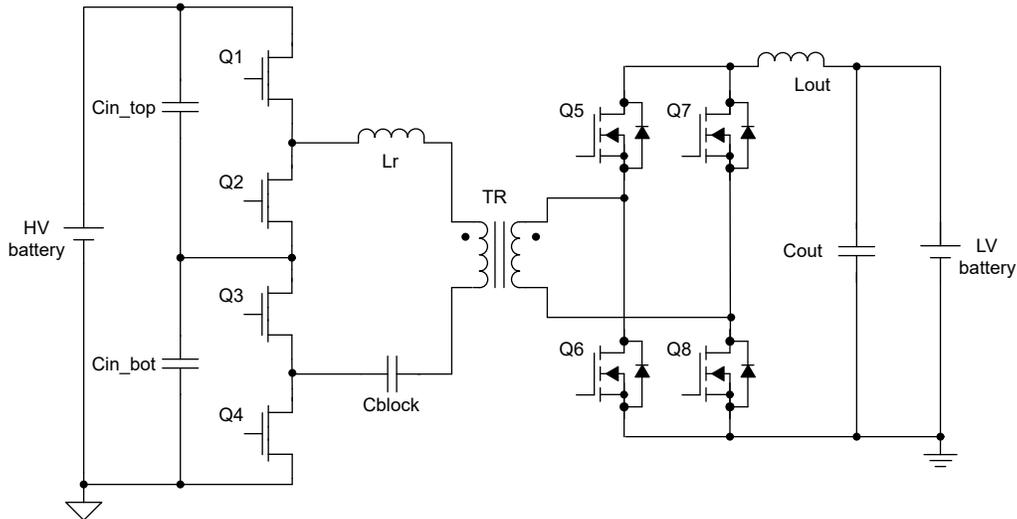


図 4-1. PMP41139 回路図

表 4-1. 提案制御方式の有無による Cin_top と Cin_bot の差分値

制御方式	VCin_top	VCin_bot	VCap_diff
提案制御方式なし	218V	190V	28V
提案制御方式	204V	202V	2V

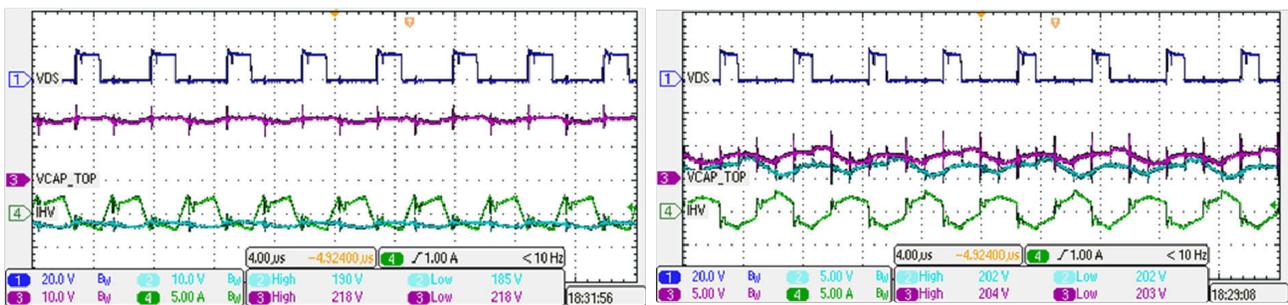


図 4-2. 提案制御方式の有無別 PSFB SHB の波形

- CH1: Q5 の Vgs
- CH2: VCin_bot
- CH3: VCin_top
- CH4: PSFB 共振タンクの電流

異なる Vin および負荷における Cin の中間電圧が [図 4-3](#) に示されています。結果、中間電圧は入力電圧の半分に近い、最大偏差は 5V 以下であることがわかりました。

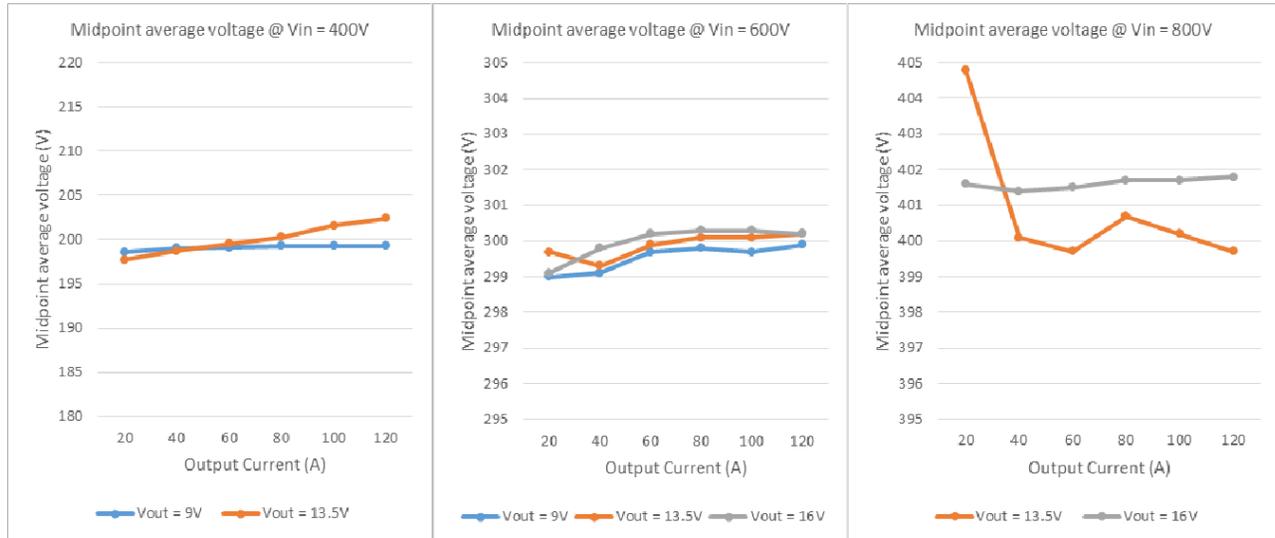


図 4-3. 異なる VIN における中電圧 VS 負荷

PMP23461 は 400V ~ 800V CLLLC コンバータのリファレンス デザインであり、図 4-1 に示すように、650V 定格の GaN デバイス LMG3522R030-Q1 がセカンダリスイッチ Q5 ~ Q8 として使用されます。出力電圧範囲は、400V ~ 900V です。表 4-2 は、異なる Vin および負荷における Cout_top と Cout_bot の電圧を示しています。理論的に分析されているように、CLLLC トポロジには中間電圧バランスの問題はありません。低出力電圧でテストすると、図 4-5 および表 4-2 に示すように、バランス制御がないにもかかわらず、中点電圧偏差が 5V であることがわかります。存在する偏差は主に、SHB の上部 2 つのスイッチと下部 2 つのスイッチのレイアウトの非対称性により発生します。

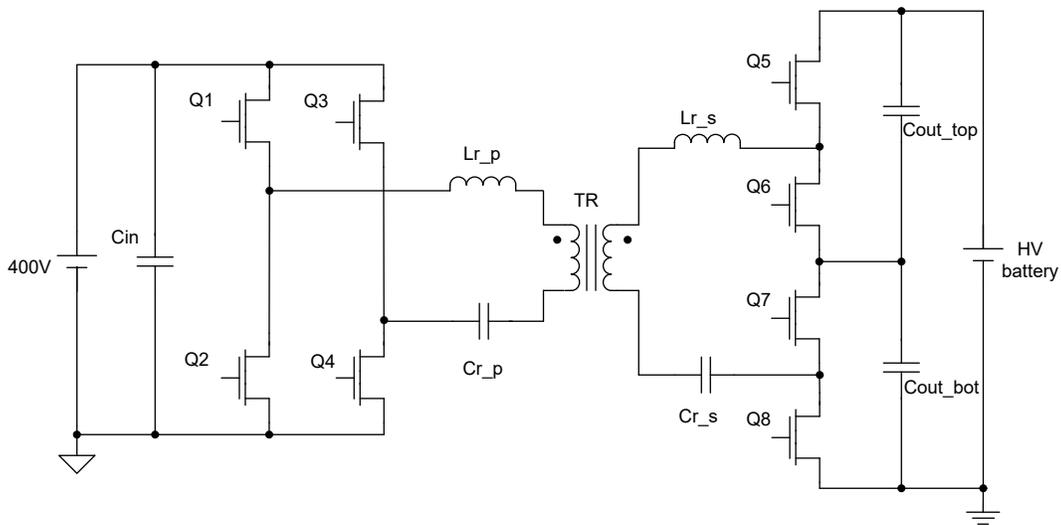


図 4-4. PMP23461 回路図

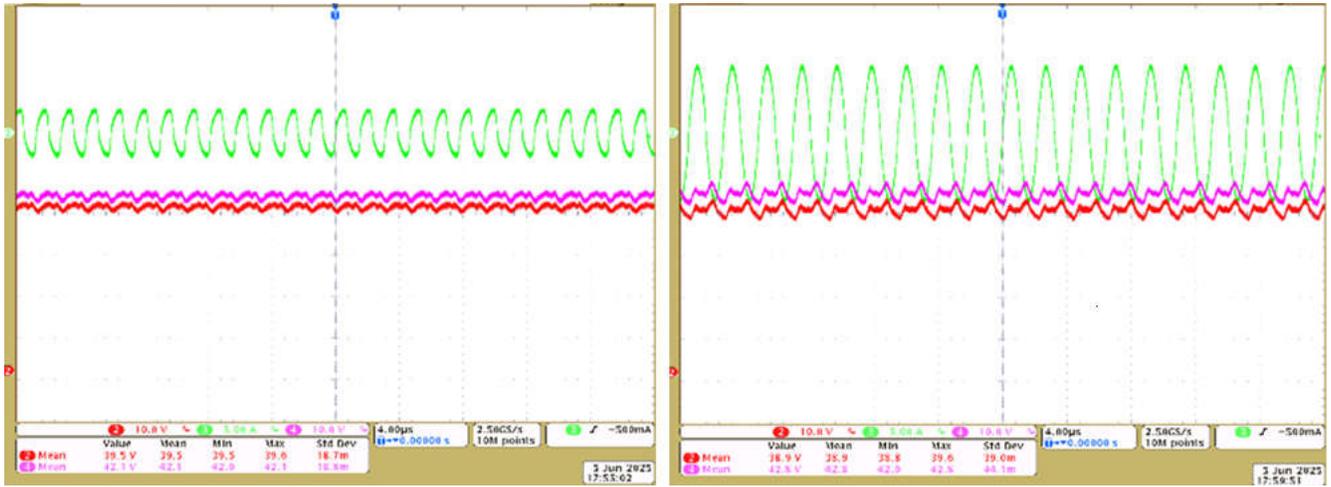


図 4-5. 異なる負荷における CLLLC SHB SR の波形

表 4-2. 異なる Vin と負荷における Cout の電圧

	Vin=50V Vout=80V/1A	Vin=50V Vout=80V/2A	Vin=50V Vout=80V/3A	Vin=100V Vout=170V/1A	Vin=100V Vout=170V/2A	Vin=100V Vout=170V/3A
VCout_top	39.5V	38.9V	38.9V	84.5V	85.8V	85V
VCout_bot	42V	42.8V	42.8V	89.6V	88.5V	89.4V

5 まとめ

前のセクションで説明したように、TLトポロジと比較すると、SHBトポロジは電力密度が高くなります。スタック型ハーフブリッジトポロジを採用すると、800V バッテリー アプリケーションで 650V GaN HEMT LMG3522R030-Q1 を使用する場合でも、1 次側でスイッチとして使用する場合でも、同期整流器として 2 次側で使用する場合でも、そのギャップを完全に克服できます。C2000 デバイスのタイプ 5 ePWM モジュールは、SHBトポロジの特別な PWM 要件を満たすことができます。また、このテスト結果から、SHB は 400V シナリオで PMP41078 のオリジナルトポロジと同様の 800V シナリオで高効率の負荷過渡性能を達成していることが示されています。この場合、絶縁型から非絶縁型のアプリケーションまで、SHB を大きくする結果が得られます。

6 参考資料

- テキサス インストルメンツ、[PMP41139 3.5kW, 800V ~ 14V DC/DC コンバータリファレンス デザイン](#)、デザイン ガイド。
- テキサス インストルメンツ、[PMP41078 GaN HEMT 付き高電圧 ~ 低電圧 DC-DC コンバータリファレンス デザイン](#)、テスト レポート。
- テキサス インストルメンツ、[PMP23461 テスト レポート](#)、テスト レポート。
- テキサス インストルメンツ、[LM3522R030-Q1 650V 30mΩ GaN FET 統合ドライバ、保護、温度レポート](#)、データ シート。

7 略称

TL	3 レベル
SHB	スタック型ハーフ ブリッジ
DC	直流電流
OBC	オンボード充電
HSHB	ハード スイッチ ハーフ ブリッジ
SPSDAB	単相シフト デュアル アクティブ ブリッジ
MVBI	中電圧バランスの問題
PWM	パルス幅変調

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