

Design Guide: TIDA-010990

アクティブ バック バランシング機能を搭載した、パッケレベルの電気化学インピーダンス分光 (EIS) 励起のリファレンス デザイン



説明

このリファレンス デザインは、バッテリー パックの EIS 励起とアクティブ バック バランシング向けに設計された、双方向絶縁型、マルチポート デュアル アクティブ ブリッジ (DAB) DC/DC コンバータを搭載しています。この設計は最大 10A のピーク ツー ピーク振幅で、0.04Hz ~ 2000Hz の正弦波電流を生成できます。また、この設計は定電流 (CC) モードと定電圧 (CV) モードの両方に対応しており、効率的なアクティブ バック バランシングを実現します。

リソース

[TIDA-010990](#)

デザイン フォルダ

[TMS320F28P550SG](#)

プロダクト フォルダ

[UCC23525](#)

プロダクト フォルダ

[UCC27834](#)

プロダクト フォルダ

[AMC0311R](#)

プロダクト フォルダ

特長

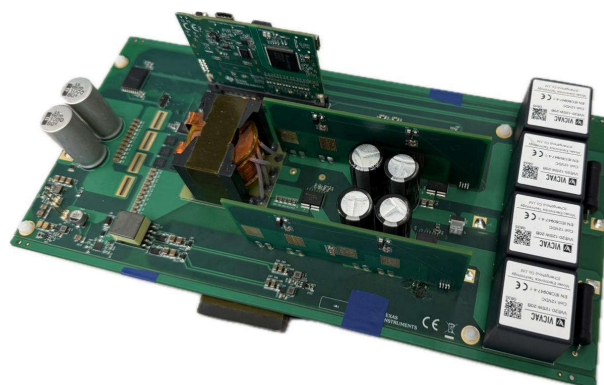
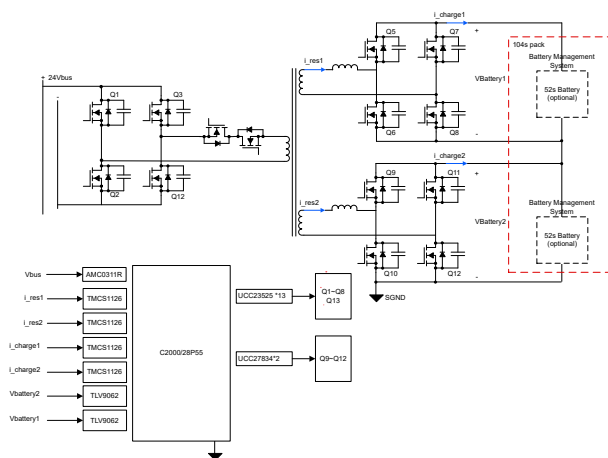
- シンプルな単一位相シフト (SPS) 制御方式を採用した双方向デュアル アクティブ ブリッジ
- 0.04hz ~ 2000hz 正弦波電流の閉ループ制御用の PI + PR 制御
- SPI および CAN 通信をサポート
- 最大 104s のバッテリー パックをサポート
- デジタル制御のための TMS320F28P55 コントローラ
- 1 つのラックで、他方に影響を与えずに APB と EIS を同時に実行可能

アプリケーション

- **ESS (エネルギー ストレージ システム) – バッテリー管理システム (BMS)**



テキサス・インスツルメンツの™ E2E サポート エキスパートにお問い合わせください。



1 システムの説明

エネルギー ストレージ システム (ESS) は、再生可能エネルギーのアプリケーションにおいて重要な役割を果たします。システムの電圧、容量、使用方法に応じて、ESS は、住宅用 ESS、商業用および産業用 ESS、グリッド ESS の 3 つのカテゴリに分類されます。商業および産業およびグリッド ESS には、それぞれがスタックされたパックを含む複数のラックが含まれます。

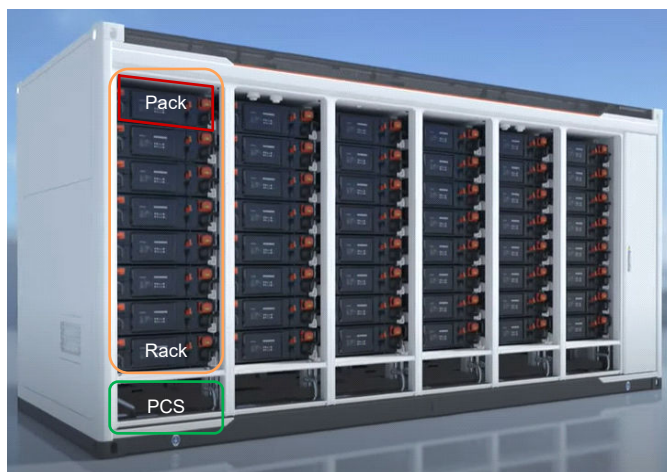


図 1-1. グリッド スケール ESS のアーキテクチャ

図 1-1 に、分散型アーキテクチャを活用した、グリッド スケールの代表的なエネルギー ストレージ システム (ESS) を示します。システムは、構造的に 3 つのコア レイヤにセグメント化されています。

- **バッテリー パック**: 基本的なエネルギー ストレージ ユニット。直列と並列に接続された複数のバッテリー セルで構成され、統合型のバッテリー管理システム (BMS) によって管理されます。
- **バッテリー ラック**: 複数のバッテリー パックをスタックして形成された垂直クラスタ。大電力グリッドの需要を満たすために、電圧と容量を集約するほか、ラック レベルの制御回路と保護回路も搭載しています。
- **電力変換システム (PCS)**: この高度に統合された分散型トポロジでは、専用のクラスタ PCS がラックの底部に直接配置されます。この分散型構成により、ラックごとに別々の充電と放電を管理できるため、セル容量の不一致 (バレル効果) による悪影響を大幅に軽減し、システム全体のエネルギー歩留まりを最大化できます。

グリッド スケールの高電圧エネルギー ストレージ システム (HV ESS) 市場は、安全性に関する重要な変曲点を迎えています。バッテリー セルの容量が 280Ah から 684Ah に急速に増加するにつれ、熱暴走のリスクと伝搬速度が指数関数的に高まっています。従来の管理手法は、主に温度のみの監視に依存しています。しかし、最新の大容量セルの物理容量が大量であるため、内部の熱異常は深刻な熱遅延という問題を抱えており、表面温度をトラッキングしても早期の警告には不十分です。

この制限を克服するために、超高速異常検出のための決定的な技術的ソリューションとして、電気化学インピーダンス分光 (EIS) が登場しました。診断の焦点を外部の熱効果から内部の化学状態に移すことにより、EIS は幅広い周波数スペクトルにわたってリアルタイムのセル インピーダンス変動を測定します。この手法により、従来の熱伝搬遅延を完全に回避できるようになり、セルの劣化セルの劣化や内部短絡を、きわめて初期の微視的構造段階で捕捉して、グリッド スケールのシステム統合を保証します。

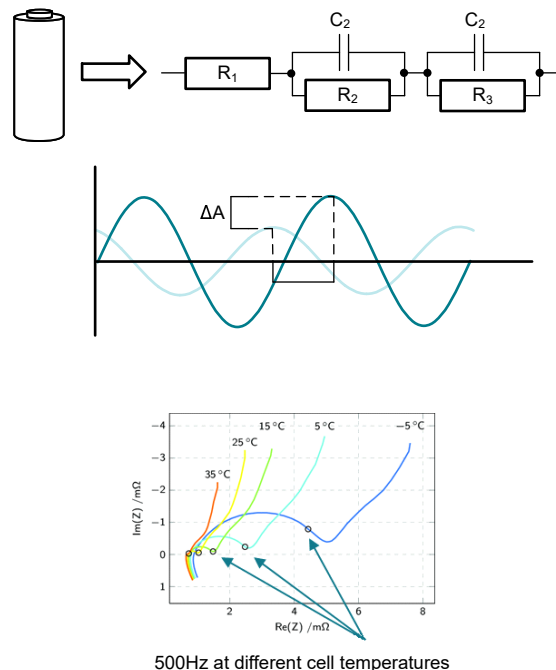


図 1-2. EIS の原理

図 1-2 に、EIS の原理を示します。機械的には、EIS は、特定の周波数範囲 (通常は数十 mHz から数 kHz) にわたって、制御された低振幅の正弦波電流 (または電圧) 摂動をバッテリーセルに注入することにより動作します。その後、システムは結果として得られる正弦波電圧 (または電流) 応答を同期測定します。励起信号と応答信号の位相シフトと振幅比を解析することにより、各周波数点で複素電気化学インピーダンス (Z) が計算されます。

電気化学的観点から見ると、バッテリーセルは純粋な抵抗ではなく、内部の物理現象 (オーム抵抗、電極界面での電荷移動、イオン拡散など) を表す抵抗、容量、インダクタンスの複雑なネットワークです。内部の短絡または局所的な過熱が大容量セルで発生し始めると、これらの微細構造特性は即座に変化します。このような電気的および化学的インピーダンスの変化は、熱が厚いゼリーロールを通過して表面温度スパイクを引き起こすよりはるか前に発生するため、EIS は熱暴走前駆体をほぼ瞬時に検出できます。

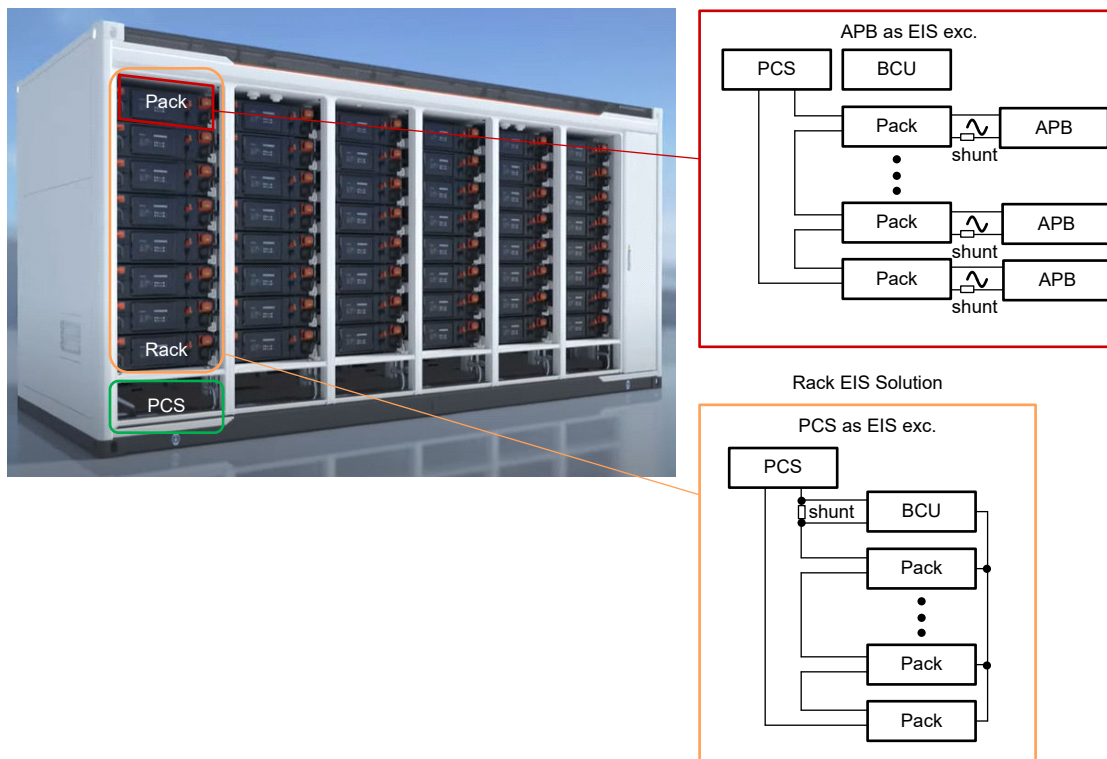


図 1-3. グリッド スケール ESS での励起

グリッド スケール ESS に EIS を実際に導入するには、正弦波の摂動を注入するための適切なハードウェアトポロジを選択することが重要です。図 1-3 に示すように、主に 2 つのアーキテクチャレベルの導入方法があります。

- ラックレベルの EIS ソリューション (励起ソースとしての PCS): この集中型のアプローチでは、ラックレベルの電力変換システム (PCS) がストリング電流全体を直接変調し、EIS 励起信号を注入します。この方法は、パックごとに追加する必要のあるハードウェアを最小化できますが、高い同相電圧と高電圧バスに沿った系統的な信号減衰が原因で、個々の大容量セルの微小なインピーダンス変化を分解するという設計上の課題に直面します。
- パックレベルの EIS ソリューション (励起ソースとしてのローカル コンバータ): この分散型のアプローチでは、バッテリーパックごとに、アクティブ パック バランシング (APB) モジュールなどの独立したローカライズされた励起ボードを導入します。励起ソースをローカルで絶縁することにより、信号対雑音比 (SNR) が大幅に改善され、その特定のパック固有の経年劣化特性に合わせてカスタマイズされた高精度のインピーダンス分光が可能になります。

このリファレンス デザインは、専用の高集積ハードウェア フレームワークを活用し、パックレベルの EIS 設計に特化して設計しています。このローカライズされたアプローチの際立った技術的利点は、EIS 励起ソースをアクティブ パック バランシング (APB) コンバータとして再利用できることです。

通常のグリッド動作中、この双方向マルチポートトポロジは定電流 (CC) または定電圧 (CV) モードで動作して、不一致のパック間でエネルギーを再分配するため、大容量セルの従来のバレル効果を除去します。安全診断がトリガされると、同じハードウェアが動的に遷移して、EIS 分析に必要な正確な 0.04Hz ~ 2000Hz の正弦波摂動を生成します。2 つの目的を統合することにより、重複するパワー エレクトロニクスが不要になり、部品表 (BOM) コストと物理的なフットプリントが大幅に削減されると同時に、システムレベルの安全性とエネルギー効率が最大化されます。

2 システム概要

2.1 ブロック図

図 2-1 は、このマルチポート DAB 双方向絶縁型 DC/DC デザインのブロック図を示します。1 次側および 2 次側は電圧と電流の検出機能を必要とします。TLV9062 デバイスは出力電圧を検出し、TMCS1126 を使用して出力電流を検出して電流ループを実行します。AMC0311R は、電圧ループを実行するために 1 次側電圧を検出するために使用します。

TMDSCNCD28P55X の制御カードはデジタル制御をサポートし、両側で UCC23525 および UCC27834 デバイスをゲートドライバとして使用します。このアーキテクチャには、2 次側に SiC、1 次側に Si MOS、DC ブロッキング コンデンサ、共振インダクタ、1 つのトランスを備えた、フルブリッジが 3 つあります。

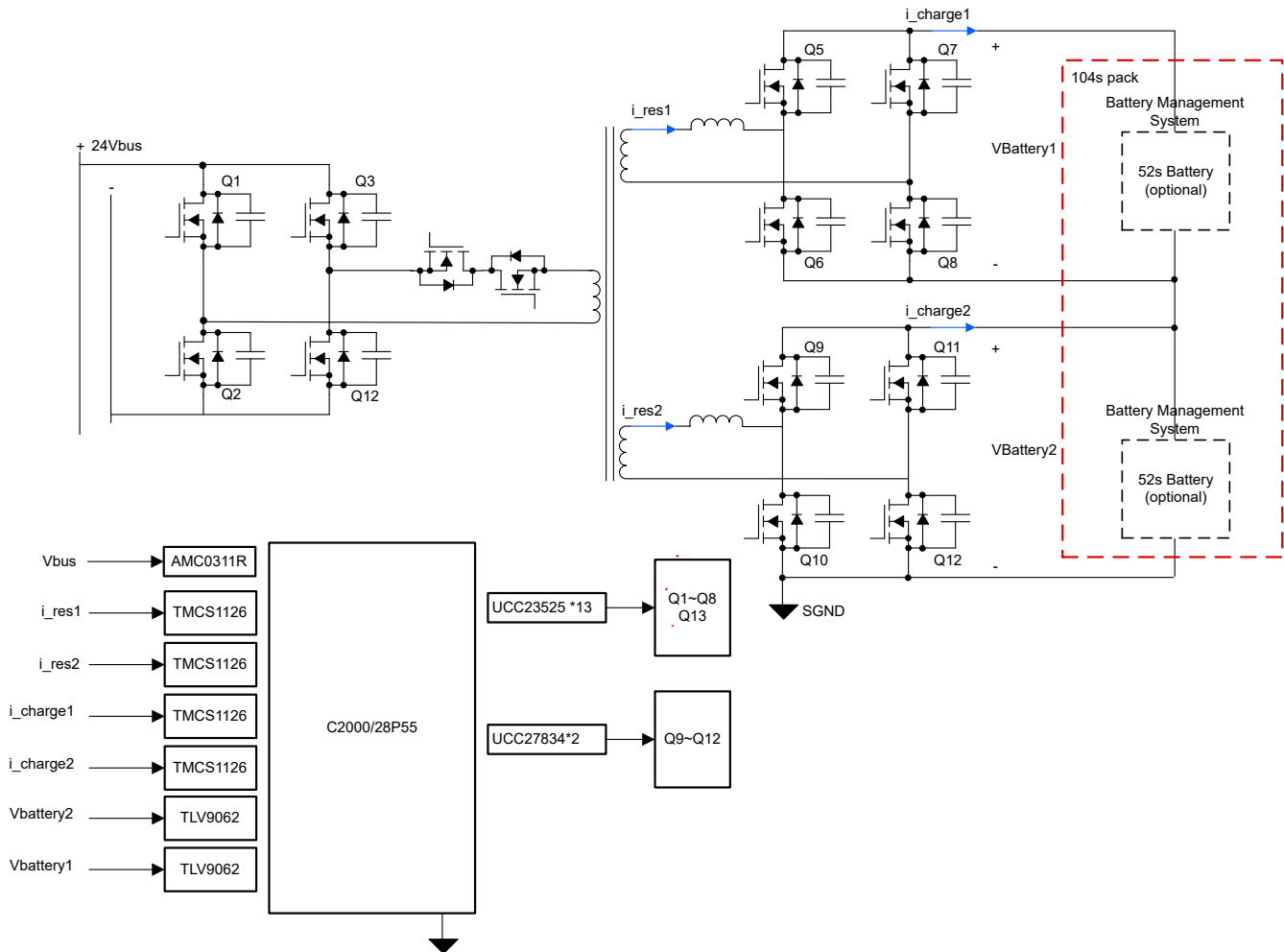


図 2-1. TIDA-010990 のブロック図

2.2 設計上の考慮事項

2.2.1 設計上の検討事項の概要

高効率で双方向の電力フローとガバナニク絶縁を実現し、バッテリーの診断とバランス確保を行うには、最適なパワー エレクトロニクス トポロジの選択が重要です。さまざまな絶縁型双方向コンバータの中で、図 2-2 に示すデュアル アクティブブリッジ (DAB) トポロジは、大電力エネルギー ストレージ アプリケーションの業界標準になりました。従来型の DAB コンバータは、1 次側のフルブリッジ インバータ、絶縁トランス、2 次側のフルブリッジ整流器で構成されています。コンバータは、1 次側ブリッジと 2 次側ブリッジの間の位相シフト角度を制御することにより、電力フローの方向と大きさの両方を高精度で安定化できます。従来型 DAB の主な利点は次のとおりです。

- ソフトスイッチング機能: 広い動作範囲にわたってゼロ電圧スイッチング (ZVS) を自然に、かつ容易に実行できるため、スイッチング損失を大幅に低減し、高周波動作を可能にして、物理的なフットプリントの最小化を実現します。
- 双方向電力フロー: 双方向のエネルギー転送をシームレスに処理できるため、連続的な充電 / 放電サイクルが必要なアプリケーションに最適です。
- 高い電力密度と絶縁: 高周波トランスは、非常に高い電力 / 体積比を維持すると同時に、安全性の確保に不可欠なガバナニク絶縁を実現します。

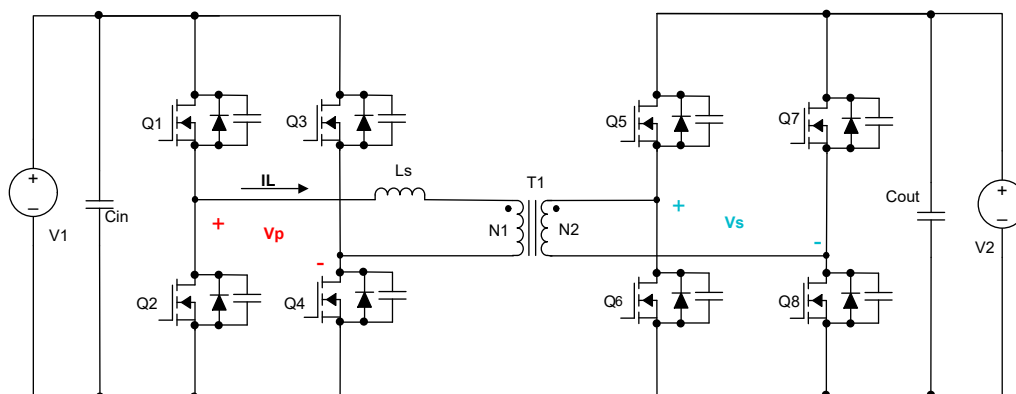


図 2-2. DAB のトポロジ

マルチポート DAB トポロジでは、図 2-3 に示すように、1 つのマルチ巻線高周波トランスによって接続された 3 つ以上のアクティブブリッジを組み込むことにより、従来の設計を拡張しています。この統合により、1 つのコンバータで複数の独立した電圧ポート間のパワーディストリビューションを同時に管理できます。この設計では、マルチポート DAB トポロジがアーキテクチャコアとして機能し、2 つのバッテリーモジュールと補助バスを接続します。すべてのアクティブなポート間の相対位相シフトを制御することにより、エネルギーを最小限の変換段で、任意のポート間で動的にルーティングできます。この先進的なトポロジは、標準的な DAB のソフトスイッチングと高効率の利点をすべて継承するだけでなく、アクティブなバック間エネルギーバランシングを実行しながら正確なマルチ周波数 EIS 励起電流を生成するために必要なマルチチャネルの柔軟性も提供します。

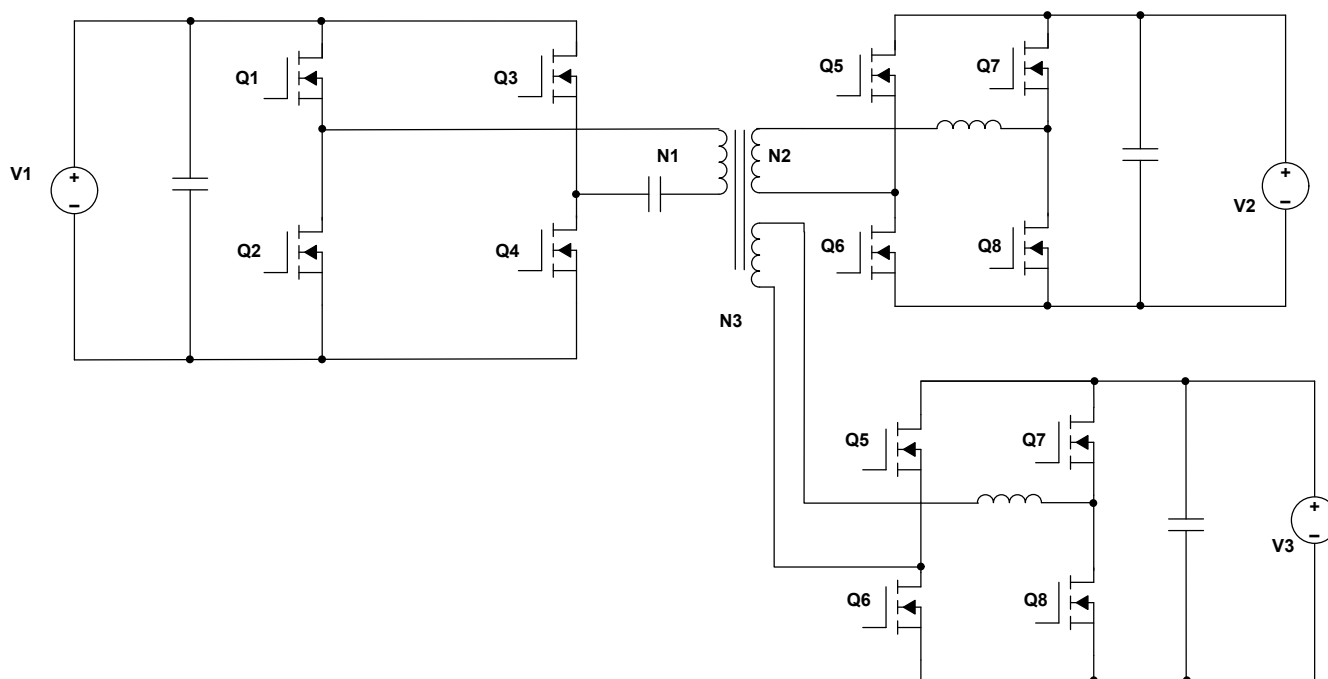


図 2-3. マルチポート DAB のトポロジ

2.2.2 DAB の基本動作原理

単一位相シフト (SPS) 変調は、デュアル アクティブ ブリッジ (DAB) コンバータ用の最も基本的で広く採用されている制御方式です。SPS 制御では、1 次側フルブリッジ (ブリッジ 1) と 2 次側フルブリッジ (ブリッジ 2) は両方とも 50% の固定デューティ サイクルで動作します。各ブリッジの対角線上のスイッチ ペア (Q1/Q4、Q5/Q8 など) は、同期的にオンとオフが切り替えられます。

この方式のコア制御変数は、外部位相シフト角度 ϕ で、1 次側の方波電圧 (V_p) と 2 次側の方波電圧 (V_s) の間に生じます。この位相シフト角度は、図 2-4 に示すように、高周波絶縁型トランス T1 を通過する電力の方向と大きさを直接安定化します。

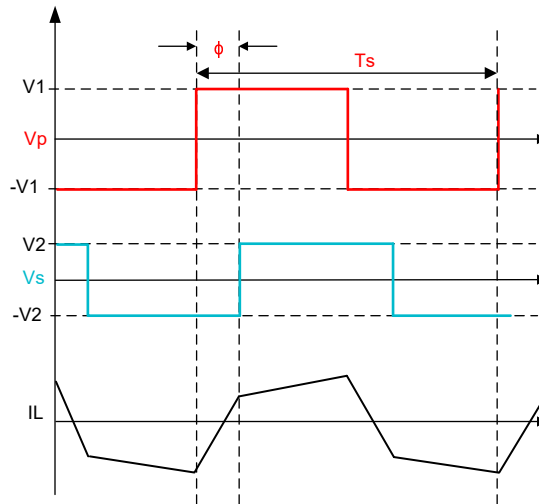


図 2-4. SPS 制御での波形

2 つのブリッジ間で伝送される平均電力 P_{12} は、直列リーケージ インダクタ L_s に蓄積され解放されるエネルギーによって制御されます。このエネルギーは、数学的には次のように表されます。

$$P_{12} = \frac{N \cdot V_1 \cdot V_2 \cdot \phi \cdot (\pi - |\phi|)}{2 \cdot \pi^2 \cdot L_s \cdot f_s} \quad \left(-\pi \leq \phi \leq \pi \right) \quad (1)$$

ここで、 V_1 は入力 DC 電圧、 V_2 は出力 DC 電圧、 f_s はスイッチング周波数、 N はトランスの巻線比 ($N = N_1/N_2$) です。

- 順方向電力モード ($0 \leq \phi \leq \pi$): V_p が V_s より進み、1 次側から 2 次側にエネルギーが流れます。
- 逆方向電力モード ($-\pi \leq \phi \leq 0$): V_p は V_s より遅れ、2 次側から 1 次側にエネルギーがシームレスに逆流する原因となります。

最大電力能力 (P_{max}) はハードウェア パラメータ L_s および f_s によって厳密に制限され、位相シフト角度 ϕ が次と等しいときに実現します $\pi/2$ 。

$$P_{max} = \frac{N \cdot V_1 \cdot V_2}{8 \cdot L_s \cdot f_s} \quad (2)$$

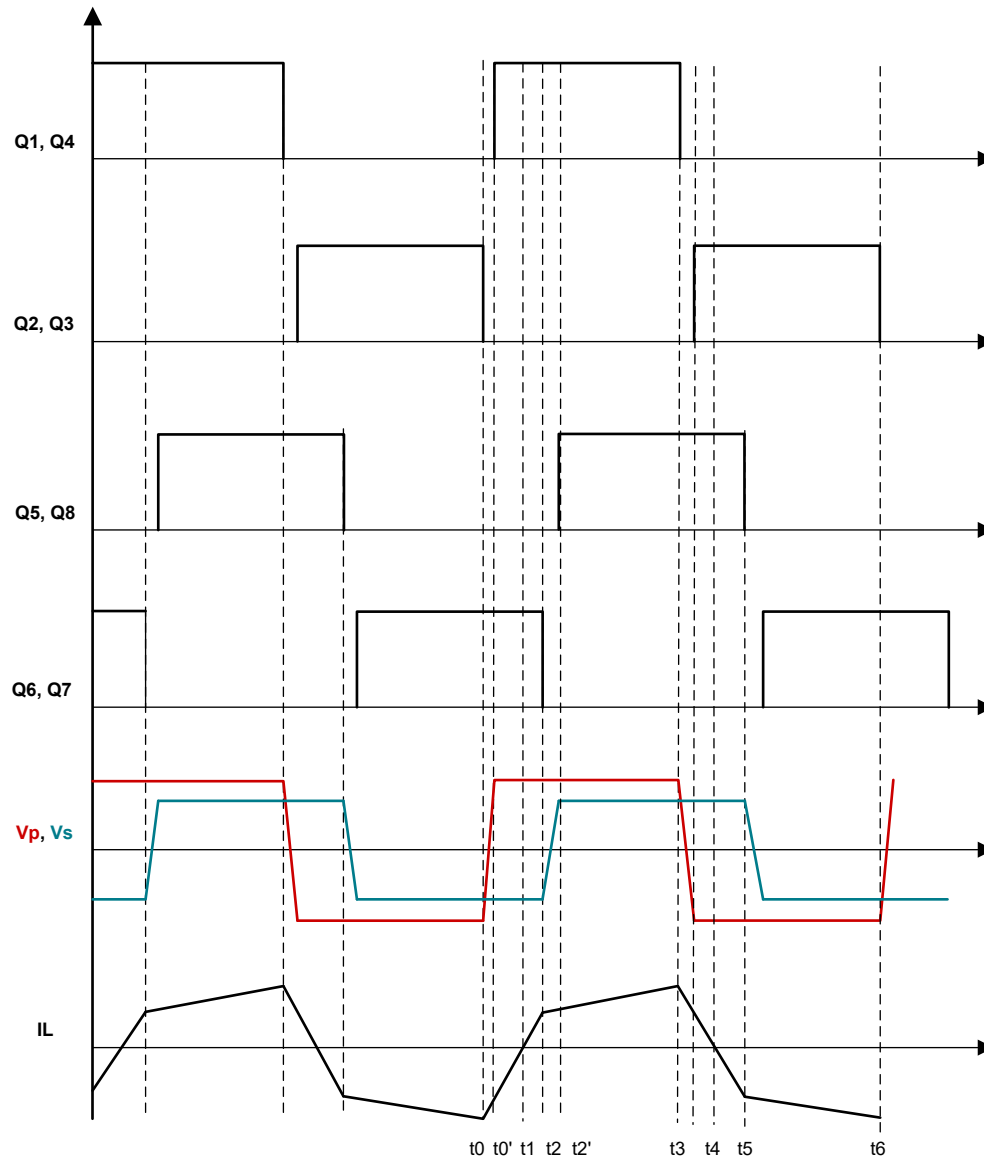


図 2-5. SPS 制御での PWM と電流の全波形

スイッチング損失を最小限に抑え、高い総システム効率を実現するため、SPS-DAB はリーケージ インダクタ L_s に蓄積された無効エネルギーに完全に依存して、MOSFET の寄生出力容量 C_{oss} を放電および充電することにより、ゼロ電圧スイッチング (ZVS) が容易になります。図 2-5 に、PWM と電流の全波形を示します。順方向動作モードを基準として、標準的なスイッチング サイクルは次の重要な間隔で進行します。

- **期間 1 (t_0 から t_0' - デッドタイム実現、図 2-6 に示す):** このとき、 t_0 の前に、Q1 および Q4 はオフになります。このデッドタイム期間中、インダクタ電流 I_L は負の値を維持すること ($I_L(t_0) < 0$) が必須です。この負電流により、 L_s に蓄積されたエネルギーが Q2 と Q3 の出力容量を充電する間に Q1 と Q4 の出力容量を強制的に放電し、ターンオン前に Q1 と Q4 の間で必要なゼロ電圧条件が生成されます。

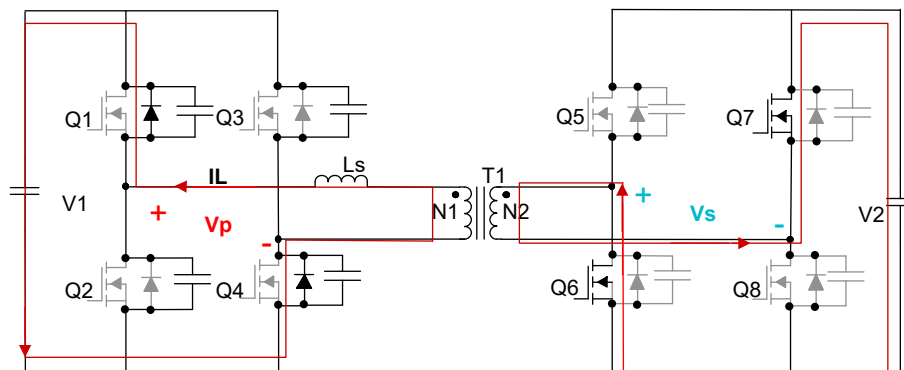


図 2-6. 期間 1 中の DAB コンバータの動作段

- 期間 2 (t_0 から t_1 - プライマリ チャネル導通、図 2-7 参照): 続いて、 t_0 では、厳格なゼロ電圧条件下でスイッチ Q1 および Q4 はオンになります (理想的な状況)。インダクタ電流は Q1 と Q4 のチャネルを通過し、直線的に上昇を開始します。

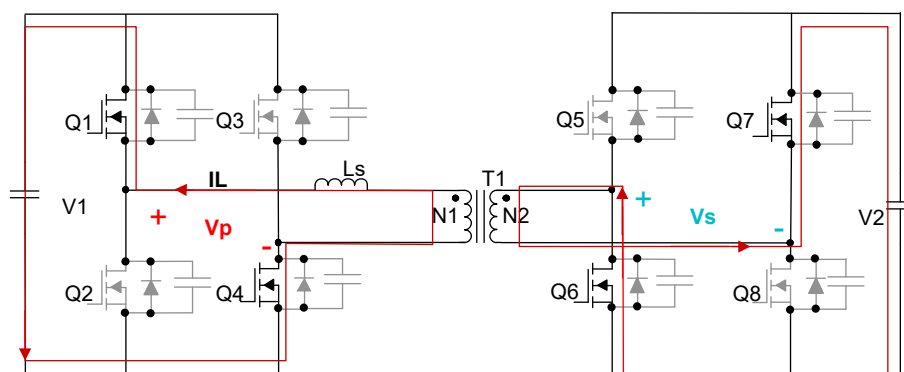


図 2-7. 期間 2 中の DAB コンバータの動作段

- 期間 3 (t_1 から t_2 - 電流の反転、図 2-8 を参照): 続いて、 t_1 では、インダクタ電流はゼロを交差してその方向を正に切り替え、トランスの両端の電圧差によって駆動される直線的な進行を継続します。

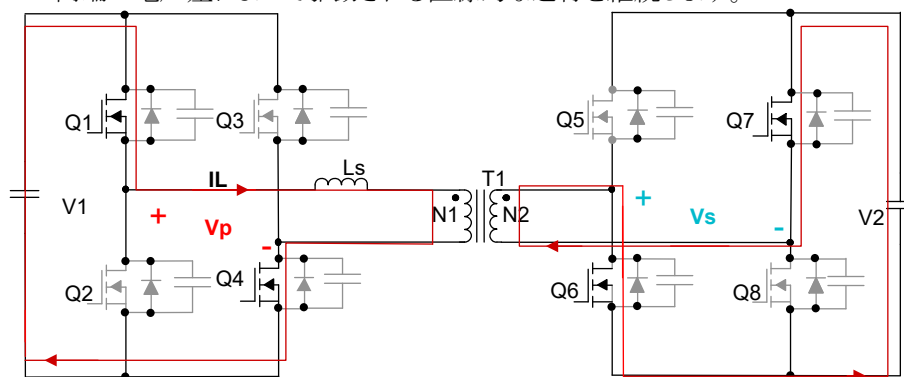


図 2-8. 期間 3 中の DAB コンバータの動作段

- 期間 4 (t_2 から t_2' - 2 次側の ZVS 実現、図 2-9 を参照): 続いて、 t_2 では、2 次側スイッチである Q5 および Q8 がオフになります。2 次側ブリッジで ZVS を有効にするには、この瞬間のインダクタ電流が正であること ($I_L(t_2) > 0$) が必須です。この正のトランス電流は、2 次側デッド タイム中に Q6 と Q7 を充電しながら Q5 と Q8 の出力容量を正常に放電します。

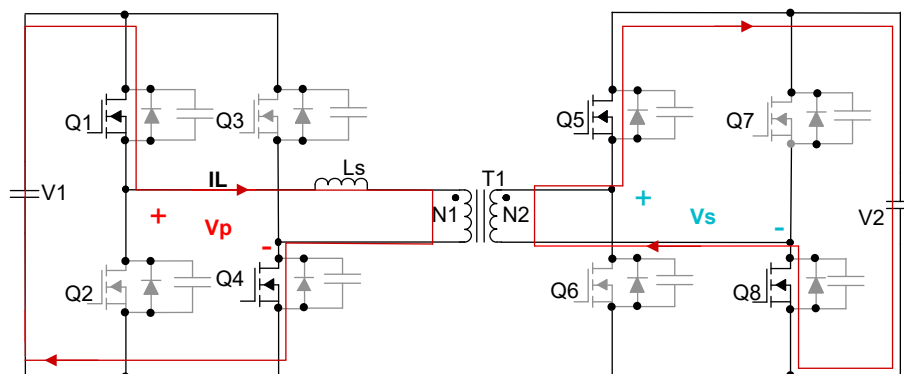


図 2-9. 期間 4 中の DAB コンバータの動作段

- 期間 5 (t_2 から t_3) - フル整流、図 2-9 を参照): 続いて、 t_2 において、Q5 および Q8 でソフトターンオンを実現しています。電流は 2 次側ブリッジチャネルを通して自然に流れ、1 次側から 2 次側への電力整流フェーズが完了します。次の半周期では、残りの FET について、 t_3 から t_6 まで同じプロセスが繰り返されます。

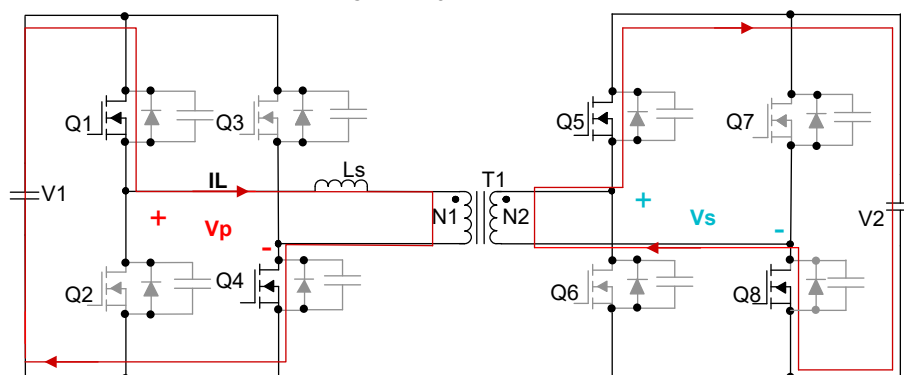


図 2-10. 期間 5 中の DAB コンバータの動作段

2.3 主な使用製品

2.3.1 TMS320F28P550SG

TMS320F28P55x (F28P55x) は、電力密度の向上、スイッチング周波数の向上、GaN および SiC 技術の使用のサポートをはじめとして、パワー エレクトロニクス の効率を向上させるように設計されたスケーラブルで超低レイテンシなデバイスである C2000™ リアルタイム マイクロコントローラ ファミリの製品です。

リアルタイム制御サブシステムは、テキサス インスツルメンツの 32 ビット C28x DSP コアをベースにしており、オンチップフラッシュまたは SRAM から実行される浮動小数点または固定小数点コードに対して 150MHz の信号処理性能を発揮します。C28x CPU は、浮動小数点演算ユニット (FPU)、三角関数演算ユニット (TMU) および VCRC (巡回冗長検査) 拡張命令セットによってさらに強化され、リアルタイム制御システムでよく使われる主要なアルゴリズムを高速化します。

CLA により、一般的なタスクの負荷の多くをメインの C28x CPU から取り除くことができます。CLA は独立の 32 ビット浮動小数点演算アクセラレータであり、CPU と並列に実行されます。さらに、CLA には独自の専用メモリリソースがあり、一般的な制御システムで必要となる主要なペリフェラルに直接アクセスできます。ANSI C のサブセット、およびハードウェアブレイクポイントやハードウェアによるタスク切り替えなどの主要な機能が標準でサポートされています。

TinyEngine™ NPU (ニューラル ネットワーク処理ユニット) は、事前トレーニング済みのモデルを使用した機械学習推論をサポートできます。600 ~ 1200MOPS (メガ オペレーション / 秒) の処理性能と、ARC 故障検出またはモーター故障検出のモデル サポートを備えている TinyEngine NPU は、SW のみをベースとする実装と比べて NN 推論サイクルを最大 10 倍まで向上できます。TI の Edge AI Studio - Model Composer または Tiny ML Modelmaker でモデルをロードしてトレーニングすると、高度な機能セットを実現できます。C28x のソースコードはこれらのツールによって生成されるため、手動コーディングは必要ありません。お客様が独自の AI トレーニング フレームワークを採用している場合は、テキサス・インスツルメンツのニューラル ネットワーク コンパイラを使用することで、使用中の AI モデルを移植して多くの C28x

ベースの MCU との互換性を確保できます。リファレンス ソリューションに関心をお持ちの場合は、テキサス インストルメンツのアーキテクチャ検出プロジェクト、またはモーター ベアリング フォルト検出プロジェクトにアクセスしてください。

F28P55x は、最大 1088KB のフラッシュ メモリをサポートしています。これらは 4 つの 256KB バンクと 1 つの 64KB バンクに分割されるため、1 つのバンクでプログラミングを行い、並行して別のバンクで実行を行えます。最大 133KB のオンチップ SRAM も利用でき、フラッシュ メモリを補完できます。

F28P55x のライブ ファームウェア アップデート ハードウェア拡張により、古いファームウェアから新しいファームウェアへのコンテキスト切り替えを高速化し、デバイス ファームウェアの更新時のアプリケーションのダウンタイムを最小限に抑えることができます。

F28P55x リアルタイム マイクロコントローラ (MCU) に内蔵された高性能アナログ ブロックは、リアルタイム シグナル チェーン性能を最適化するために、処理および PWM ユニットと密結合されています。24 個の PWM チャネルはすべて周波数に依存しない分解能モードをサポートしており、3 相インバータから、力率補正、高度なマルチレベル電源トポロジまで、さまざまな電力段を制御できます。

構成可能ロジック ブロック (CLB) を内蔵しているため、ユーザーはカスタム ロジックを追加し、FPGA に類似した機能を C2000 リアルタイム MCU に統合できます。

インターフェイスは、各種の業界標準通信ポート (SPI、SCI、I2C、PMBus、LIN、CAN FD など) によりサポートされており、最適な信号配置を行うための複数のピン多重化方法を備えています。

2.3.2 TMCS1126

TMCS1126 は、業界をリードする絶縁性と精度を備えたガルバニック絶縁ホール効果電流センサです。入力電流に比例する出力電圧により、優れた直線性と、あらゆる感度オプションで低ドリフトを実現しています。ドリフト補償を内蔵した高精度のシグナル コンディショニング回路は、システム レベルのキャリブレーションなしで、温度範囲と寿命全体にわたり 1.4% 未満の最大感度誤差を達成しており、室温キャリブレーションを 1 回のみ実行した場合には、寿命および温度ドリフトを考慮しても 0.9% 未満の最大感度誤差を達成します。

AC または DC 入力電流は内部導体流れ、そこで発生する磁界を、内蔵のオンチップ ホール効果センサで測定します。コアレス構造のため、磁気コンセンレータは不要です。差動ホール センサは、外部の浮遊磁界による干渉を排除します。導体抵抗が小さいので、測定可能な電流範囲が最大 $\pm 120\text{A}$ まで拡大すると同時に、電力損失を最小化し、放熱要件を緩和できます。5kVRMS に耐える絶縁能力と、最小 8mm の沿面距離および空間距離により、高いレベルの信頼性を得る寿命をもった強化動作電圧を実現します。

内蔵シールドにより、優れた同相除去と過渡耐性を実現しています。固定感度とすることで、デバイスは 3V~5.5V の単一電源で動作でき、レシオメトリック誤差をなくし、電源ノイズ除去を向上させています。TI は、グレード B のオプションを低コストで提供しています。

2.3.3 UCC23525

UCC23525 ドライバは、IGBT、MOSFET、SiC MOSFET 用の、フォトカプラ互換、シングル チャネル絶縁型ゲートドライバです。ソース 5A、シンク 5A のピーク出力電流に対応し、5kVRMS の強化絶縁定格を持っています。電源電圧範囲が 30V と高いため、バイポーラ電源を使用して IGBT および SiC パワー FET を効果的に駆動できます。UCC23525 は、ローサイドとハイサイドの両方のパワー FET を駆動できます。主な機能と特性は、標準的なオプトカプラ ベースのゲートドライバに比べて性能と信頼性を大幅に向上させると同時に、回路設計とレイアウト設計の両方でピン互換性を維持しています。

特に、高い同相過渡耐性 (CMTI)、低伝搬遅延、小さなパルス幅歪みは、性能の大きな特長です。厳密なプロセス制御により、部品間スキューも小さくなっています。入力段はダイオード エミュレーション (e-diode) であり、フォトカプラ ゲートドライバで使われている従来型 LED に比べて、長期的な信頼性と優れた経時特性を実現します。UCC23525 は、5kVRMS の強化絶縁定格に対応するストレッチ SO-6 パッケージで提供されます。ストレッチ SO-6 パッケージは、沿面距離と空間距離がどちらも >8.5mm であり、材料グループ I (比較トラッキング指数 (CTI) >600V) のモールド コンパウンドを使用しています。

UCC23525 は高性能で信頼性が高いため、あらゆる種類のモーター駆動、ソーラー インバータ、産業用電源、電化製品に最適なデバイスです。高い温度で動作するため、従来のフォトカプラでは対応できなかったアプリケーションで活用する機会が広がります。

2.3.4 UCC27834

UCC278X4 は、230V のハーフブリッジ ゲートドライバで、ソース 3.5A、シンク 4A の電流能力を持ち、パワー MOSFET を駆動するよう設計されています。このデバイスは、1 つのグランドリファレンス チャネル (LO) と、ブートストラップ電源ブリッジ構成の MOSFET を駆動するよう設計された 1 つのフローティング チャネル (HO) から構成されています。このデバイスは、高速伝搬遅延と、両チャネル間の遅延マッチングに優れています。UCC278X4 は、8.5V ~ 20V の幅広い VDD 動作電圧を許容してより広範囲のゲート電圧駆動をサポートし、ローサイド (VDD) およびハイサイド (HB) バイアス電源の UVLO 保護も実現します。UCC27834 にはインターロック機能オプションが含まれており、両方の出力が同時にオンになるのを防ぎます。

このデバイスは、堅牢な駆動能力を備え、高い dV/dt 許容誤差 (100V/ns) と、スイッチノード (HS) における広い負の過渡安全動作領域 (NTSOA) など、非常に優れたノイズおよび過渡耐性を備えています。UCC278X4 は、SOIC-8 ピンパッケージで提供され、 -40°C ~ 150°C の温度範囲で動作するよう設計されています。

2.3.5 AMC03111R

AMC0x11R は、2.25V、ハイインピーダンス入力とシングルエンドのレシオメトリック出力を備えた、高精度、電氣的絶縁型アンプです。高インピーダンス入力は、高インピーダンスの抵抗分圧器や出力抵抗の高い他の電圧信号源と接続するよう最適化されています。

この絶縁バリアは、異なる同相電圧レベルで動作するシステム領域を分離します。絶縁バリアは磁気干渉に対して非常に耐性があります。このバリアは、最大 5kVRMS (DWV パッケージ) の強化絶縁と、最大 3kVRMS (D パッケージ) (60s) の基本絶縁を実現することが認定されています。

AMC0x11R は、入力電圧に比例するシングルエンド信号を出力します。フルスケール出力は、REFIN ピンに印加される電圧によって設定されます。AMC0x11R の出力は、ADC の入力に直接接続するように設計されています。ADC の動的入力電圧範囲と一致させるには、REFIN を ADC と同じ基準電圧に接続します。

AMC0x11R デバイスは、8 ピンのワイド ボディおよびナロー ボディ SOIC パッケージで供給され、 -40°C から 125°C までの温度範囲で完全に動作が規定されています。

2.4 システム設計理論

2.4.1 スイッチング周波数とトランス比の設計

TIDA-010990 の回路図を 図 2-11 に示します。

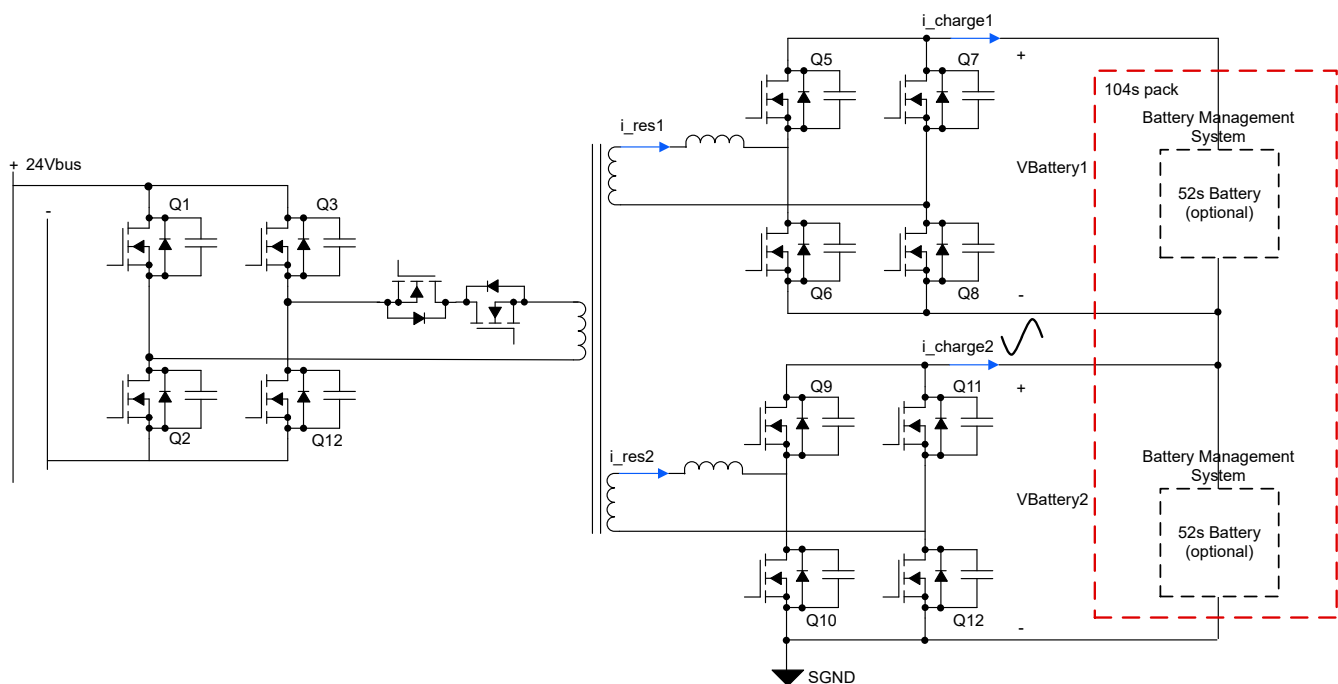


図 2-11. TIDA-010990 の回路図

スイッチング周波数 (f_s) は、対象の EIS 励起帯域幅とコンバータの熱効率との間の重要なトレードオフを表します。必要とされる最大 2kHz の EIS 励起周波数を十分な制御分解能かつ低信号歪みでサポートするには、スイッチング周波数を励起スペクトルよりも大幅に高くする必要があります。

同時に、バックレベル筐体内におけるスイッチング損失および磁気コア損失を最小限に抑えるため、最適なスイッチング周波数として 25kHz が選択されます。

無効電力を最小限に抑え、標準アクティブ バランシング条件で最適化されたソフト スwitchング (ZVS) 性能を実現するには、トランスの巻線比をポート間の公称電圧変換比に合わせる必要があります。回路図 (図 2-11) に示すように、1 次側 DC バス電圧 V_{bus} は 24V に安定化されており、各 2 次側ポートは 52s バッテリーパックに接続されています。リチウムイオンセルの公称電圧が 3.3V であると仮定すると、 $V_{battery1}$ と $V_{battery2}$ の両方の公称ポート電圧は約 171.6V ($3.3V \times 52$) になります。したがって、1 次側巻線 (N1) と同一の 2 次側巻線 (N2、N3) の間のトランスの巻線比は次のように指定されます。

$$N_1:N_2:N_3 = 1:7.15:7.15 \quad (3)$$

2.4.2 共振インダクタンスの設計

直列リーケージ インダクタンスは、コア エネルギー バッファリング素子として機能し、SPS 変調で最大電力伝送能力を制御します。この部品は、EIS 診断モードで必要になる極端な動作条件に基づいて最適化されています。

プライマリ スイッチ Q13 がディスエーブルになると、プライマリ ポートは完全に分離されます。このトポロジは、対称型の 2 次側間 DAB コンバータとして機能し、巻線 N2 と巻線 N3 の間にエネルギーを動的にシャッフルして、5A のピーク振幅の正弦波電流を注入します。理想的な SPS 電力式によれば、公称電圧 (171.6V) と最適化された位相シフト角で必要とされる目標合計ループ インダクタンス ($\phi = \pi/4$) は約 128 μH 減少時:

$$L_{total_theoretical} = \frac{V_1 \cdot V_2 \cdot \phi(\pi - \phi)}{2\pi^2 \cdot f_s \cdot P_{max}} \quad (4)$$

対称的なモジュール式のハードウェア レイアウトを確保しながら数学的にこの条件を満たすため、この設計では 2 次側ポートの両方にループ インダクタンスを分割して割り当てます。2 つの同一の外部共振インダクタ i_{res1} と i_{res2} が配置され、それぞれで次の公称値が選択されます: 50 μH まで同じプロセスが繰り返されます。これにより、合計初期ループインダクタンスは約 100 μH になり(トランスの寄生リーケージを除く)、高効率の 45° 位相シフト ウィンドウ周りの公称制御軌道を完全に配置します。

2.4.3 DC ブロッキング コンデンサ設計

DAB コンバータでは、ゲートドライバの伝搬遅延や部品のミスマッチに起因するわずかなボルト秒の非対称性があれば、高周波トランスに DC バイアス電流が注入され、コア飽和が深刻なものになる可能性があります。したがって、DC ブロッキング コンデンサ C_b を、高周波の AC 側のトランス巻線および共振インダクタと直列に配置する必要があります。

C_b の選択は、25kHz のスイッチング周波数によって厳密に判断され、以下の 2 つのハードウェア制約を満たす必要があります。

1. **インピーダンスドミナンス防止:** 電力伝送能力が、共振インダクタ ($L_{total} = 100 \mu H$) により厳密に制御されるようにするには、スイッチング周波数のブロッキング コンデンサのインピーダンス ($f_s = 25 \text{ kHz}$) が、インダクタのインピーダンスよりも大幅に小さくなる必要があります (通常 10% 未満)。こうすることにより、 C_b は標準的な SPS 電力方程式に干渉しません。

$$X_{Cb} = \frac{1}{2\pi \cdot f_s \cdot C_b} \leq 10\% \cdot (2\pi \cdot f_s \cdot L_{total}) \quad (5)$$

2. **共振周波数の配置:** C_b と L_{TOTAL} によって形成される意図しない直列共振周波数 (f_r) は、大きな電圧オーバーシュートを防止し、制御の不安定性を防止するため、スイッチング周波数より安全に低い値に配置する必要があります。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{total} \cdot C_b}} \ll f_s \quad (6)$$

25kHz の動作周波数と 100 μ H ループ インダクタンスの条件に基づいて、 C_b に最適な容量は範囲 2 μ F から 5 μ F までになるように計算され、次を選択します: 10 μ F)。熱劣化なしで連続的な高周波スイッチング ストレスに耐えるよう、AC RMS 電流定格が高周波、低 ESR のポリプロピレン フィルム コンデンサまたは多層セラミック コンデンサ (MLCC) を選択する必要があります。

2.4.4 ハードウェア設計理論

このセクションでは、ハードウェア関連の選定や、PCB の回路図の例について説明します。

2.4.4.1 電力段

図 2-12 に、双方向絶縁型マルチポート DAB コンバータの電力段を示します。1 次側は 60V、2.2m Ω 、N チャネル、パワー MOSFET CSD18540Q5B で構成されており、24V の DC 電圧をブロックします。2 次側は 400V、25.4m Ω 、SiC IMBG40R025M2H で構成されており、200V の DC 電圧をブロックします。

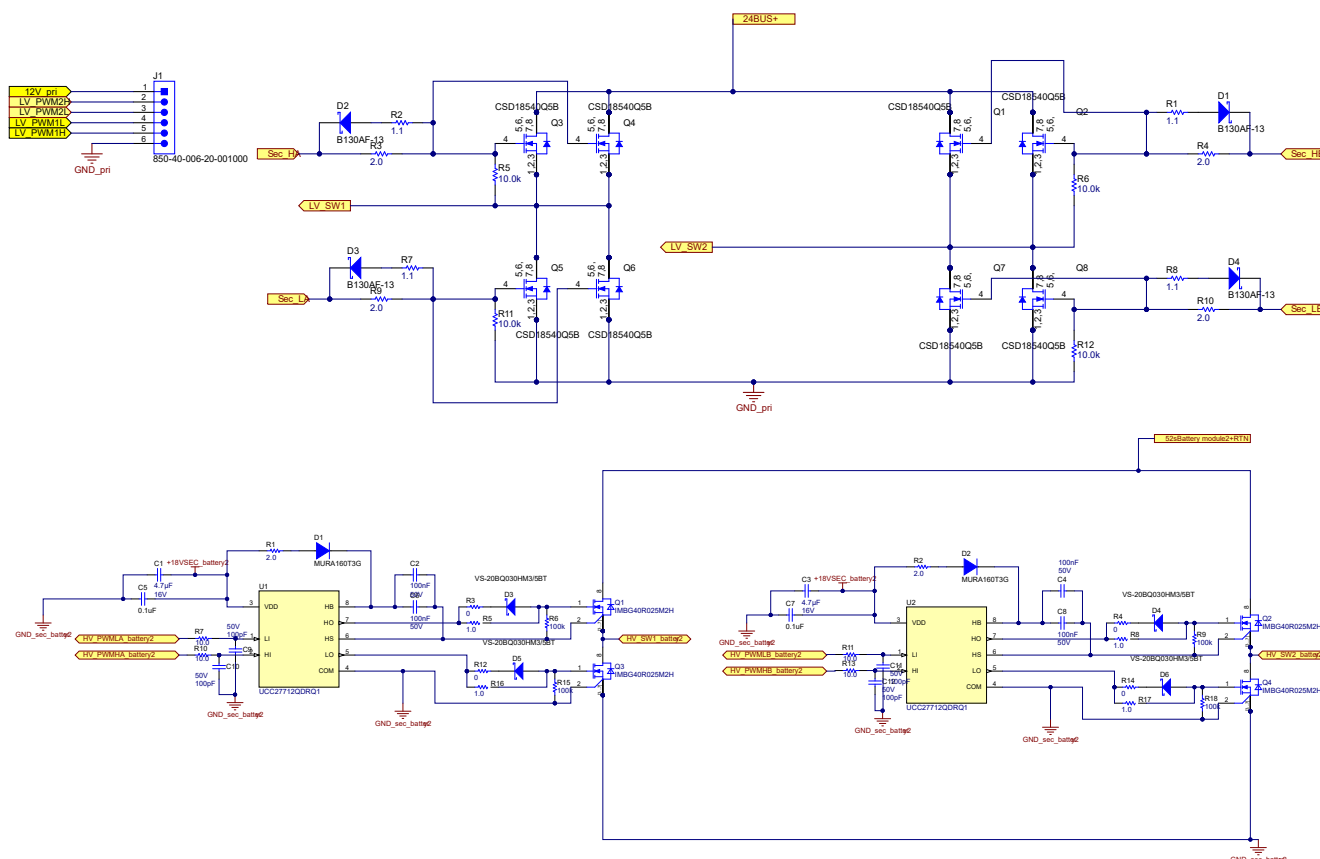


図 2-12. 電力段

2.4.4.2 センシング

この設計では、逆方向モードで一定電圧ループを実行するために、入力電圧を検出する必要があります。1 次側 DC 電圧を検出する必要があります。

図 2-13 に、1 次側電圧センシング回路を示します。検出される最大 1 次側バス電圧は 30V で、MCU は 2 次側に配置されます。したがって、1 次側 DC 電圧を検出するために AMC0311R を選択します。

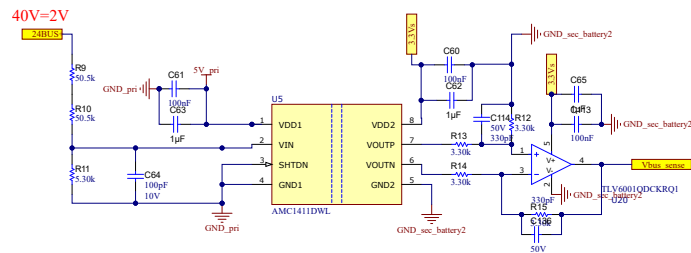


図 2-13. 1 次側電圧センシング回路

図 2-13 に、2 次側電圧センシング回路を示します。検出する 2 次側バッテリーの最大電圧は 200V です。

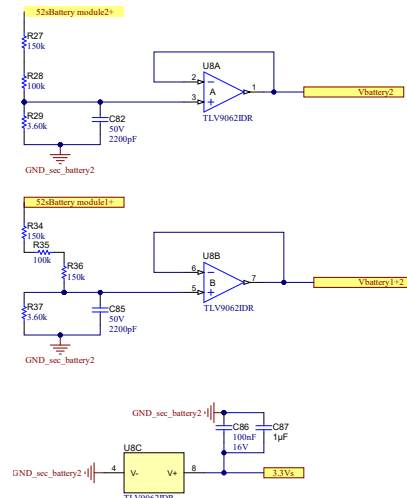


図 2-14. 2 次側電圧センシング回路

この設計では、EIS モードで電流ループを実行するために、入力電圧を検出する必要があります。2 次側電流を検出する必要があります。図 2-14 に、2 次側電流検出を示します。最大 10A の出力電流を検出するように TMCS1126B4 を選択します。図 2-15 には、保護に使用される共振タンク電流も示されています。TMCS1126B4 も選択してください。

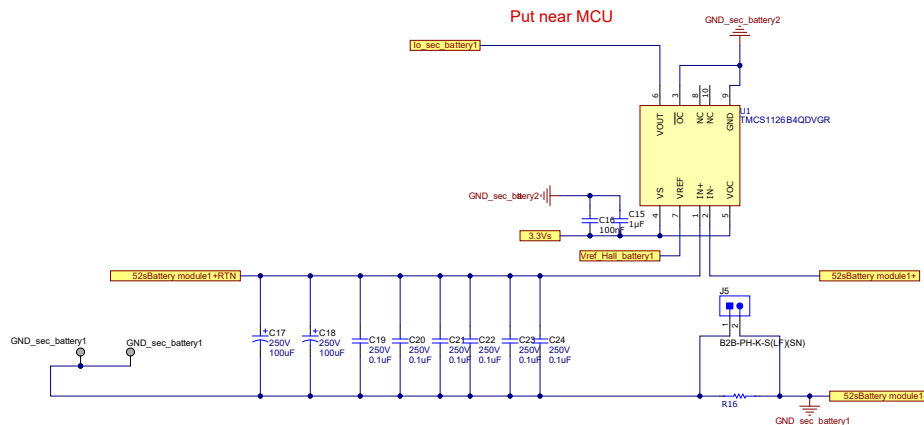


図 2-15. 2 次側電流検出回路

3 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、およびテスト結果

3.1 ハードウェア要件

このリファレンス デザインには、以下のハードウェアが必要です。

- TIDA-010990 電源ボード 1 枚
- TMDSCNCD28P55 制御カード 1 枚
- USB Type-C® ケーブル
- ノートブック PC

DUT への電力供給と評価には、以下の試験装置が必要です。

- 必要な電流で 0V ~ 200V の電圧を供給できる双方向 DC 電源
- 電力アナライザ
- 補助電源
- オシロスコープ
- 絶縁された電圧プローブおよび電流プローブ

3.2 テスト設定

このリファレンス デザインの効率をテストするために、[図 3-1](#) に示す機器を使用します。

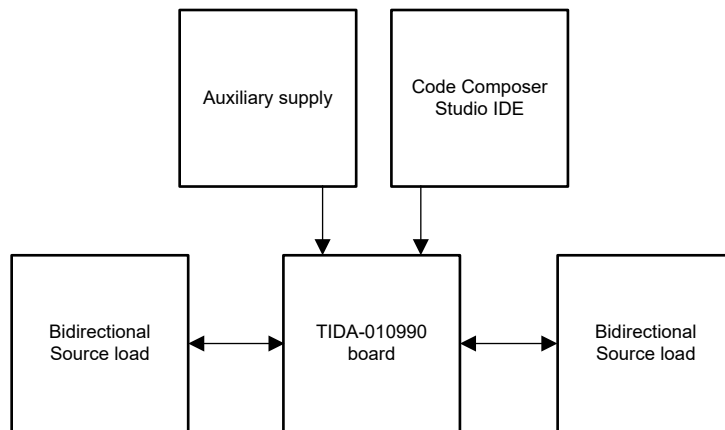


図 3-1. テスト設定

- 双方向コンバータであり、入力と出力の両方を双方向の電力源と負荷に接続する必要があります。双方向の電力源と負荷は 200V 5A をサポートする必要があります。
- 18V、1A に 1 つのチャンネルを供給する補助電源。
- TMDSCNCD28P55 制御カード 1 枚
- 電力アナライザ
- 電圧および電流を測定する絶縁プローブを搭載したオシロスコープ

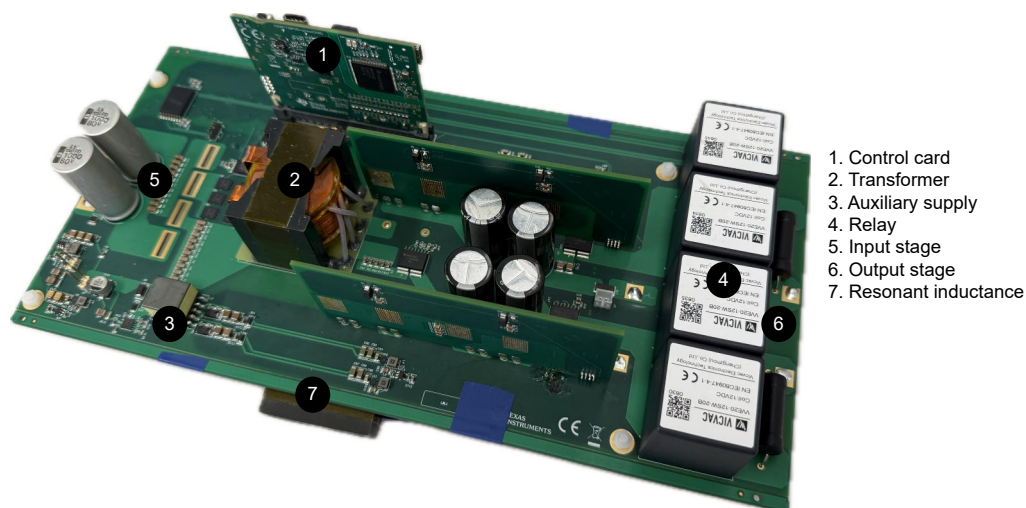


図 3-2. TIDA-010990 ボード

3.3 テスト結果

次に、1Hz、50Hz、500Hz、1000Hz、1600Hz、2000Hz EIS 励起電流のテスト結果を示します。赤は EIS 励起電流、緑は共振電流を表しています。

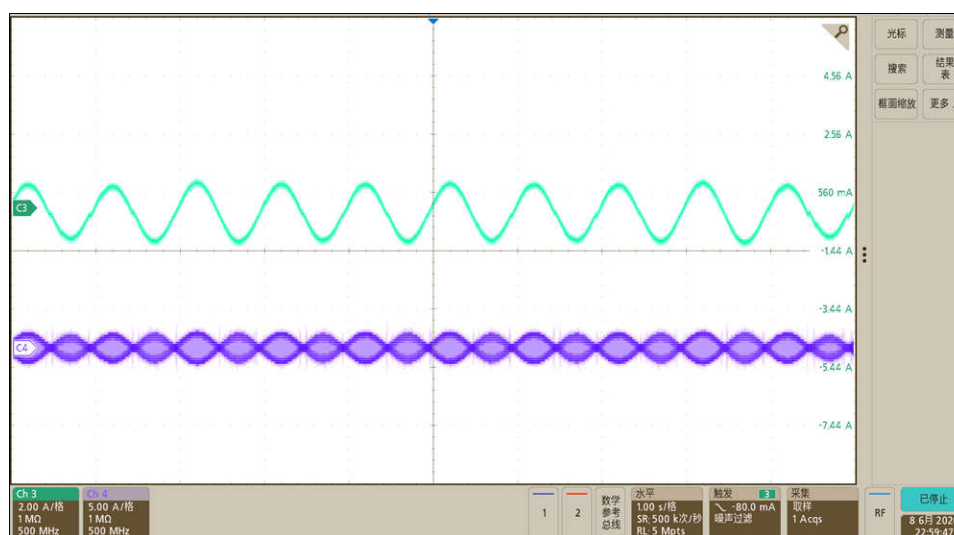


図 3-3. 1Hz テスト波形

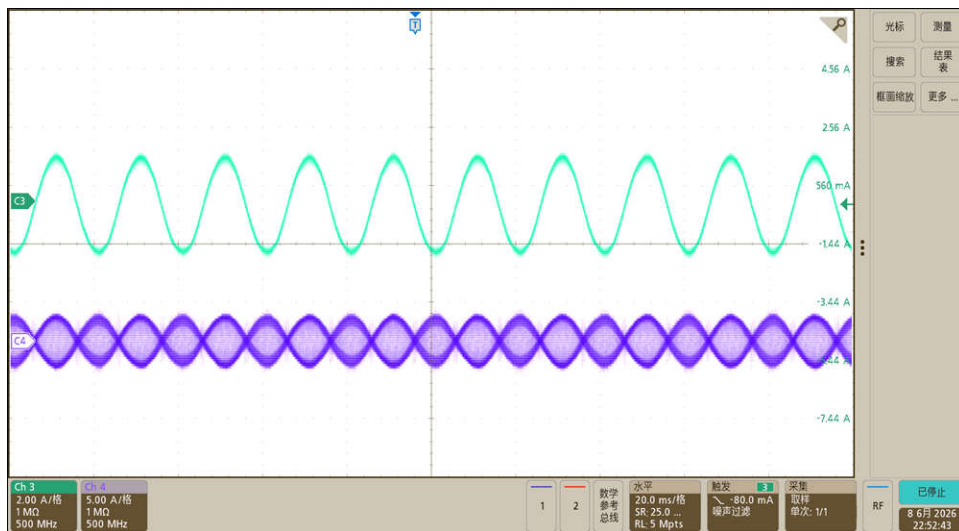


図 3-4. 50Hz テスト波形

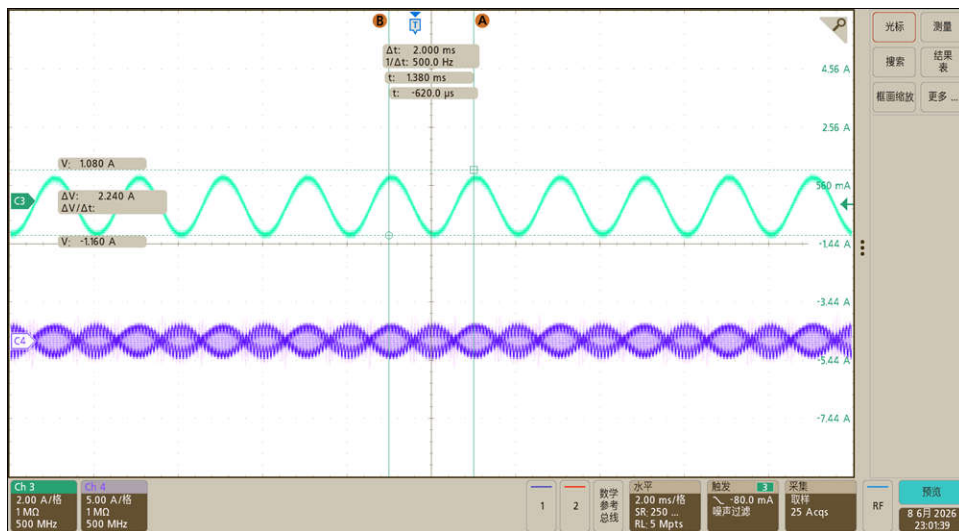


図 3-5. 500Hz テスト波形

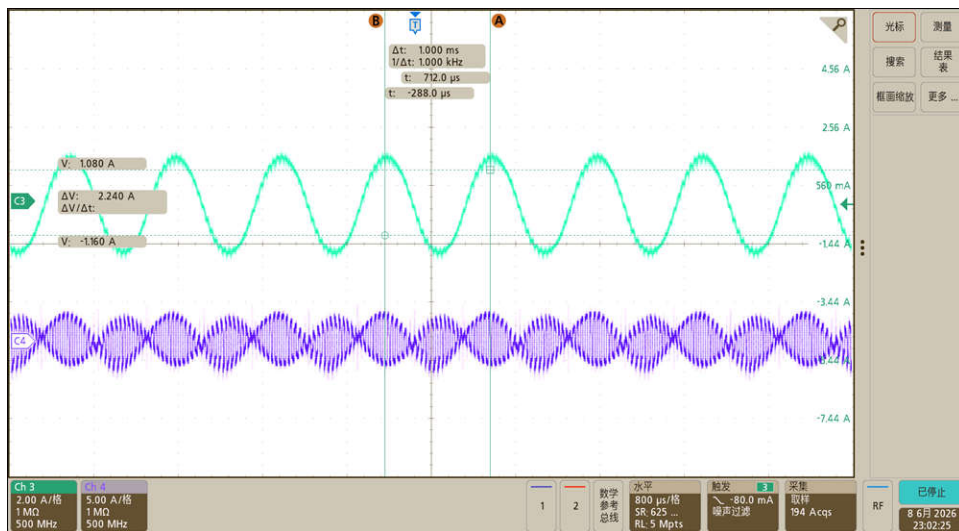


図 3-6. 1000Hz テスト波形

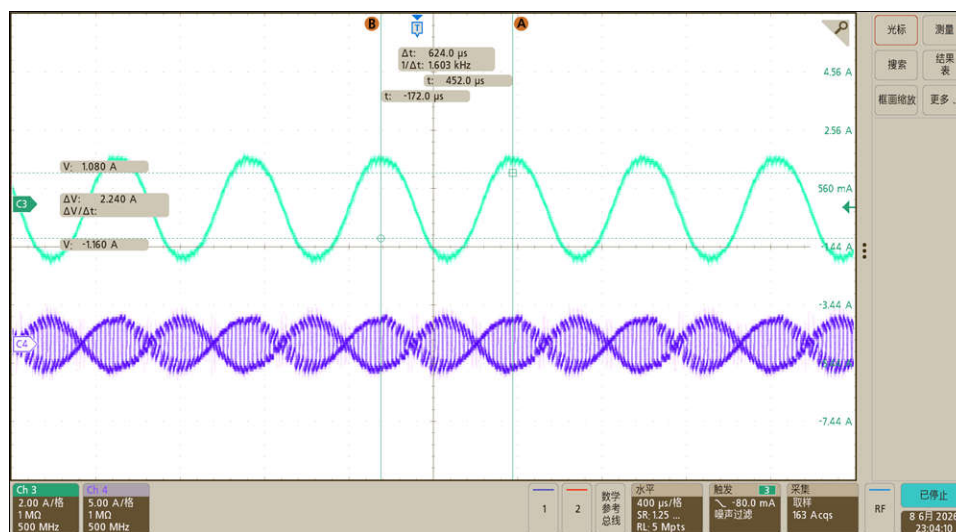


図 3-7. 1600Hz テスト波形

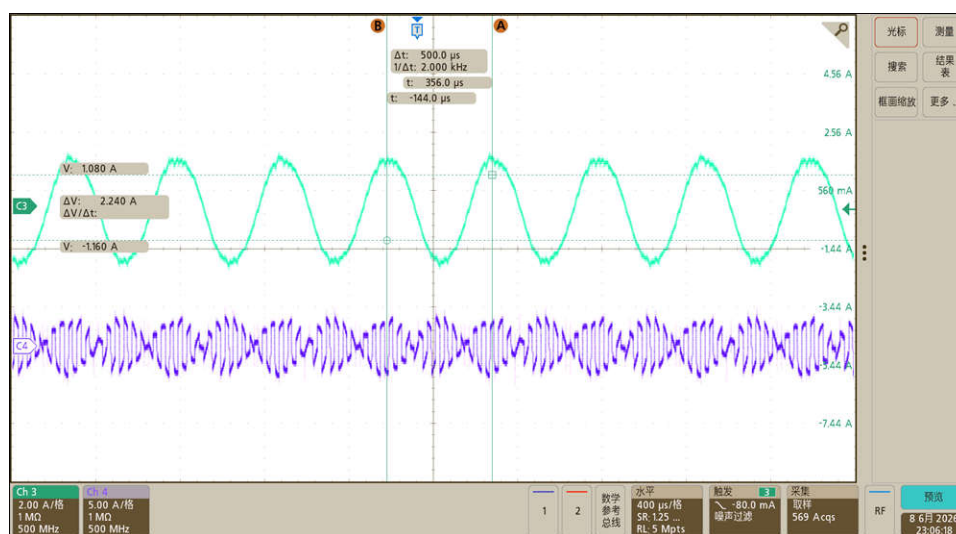


図 3-8. 2000Hz テスト波形

4 設計とドキュメントのサポート

4.1 デザイン ファイル

4.1.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDA-010990](#) のデザイン ファイルを参照してください。

4.1.2 BOM

部品表 (BOM) をダウンロードするには、[TIDA-010990](#) のデザイン ファイルを参照してください。

4.2 ツールとソフトウェア

ツール

C2000Ware C2000Ware は開発期間を大幅に短縮するソフトウェアと資料を包括的に提供します。C2000Ware には、特定デバイス向けドライバ、ライブラリ、ペリフェラル サンプルが収録されています。

ソフトウェア

[簡単な説明](#)

[説明](#)

4.3 ドキュメントのサポート

1. テキサス・インスツルメンツ、『[TMS320F28P55x リアルタイム マイクロコントローラ](#)』データシート [SPRSP85](#)
2. テキサス インスツルメンツ、『[UCC23525、5A ソース、5A シンク、5kVRMS フォトカプラ互換シングル チャネル強化絶縁ゲートドライバ](#)』データシート
3. テキサス インスツルメンツ、『[UCC278X4 高速、230V ハーフ ブリッジドライバ、3.5A、4A 駆動力、最大 100V/ns のノイズ耐性](#)』データシート
4. テキサス インスツルメンツ、『[デュアル アクティブ ブリッジトポロジの概要](#)』電源設計セミナー

4.4 サポート・リソース

[テキサス・インスツルメンツ E2E™ サポート・フォーラム](#)は、エンジニアが検証済みの回答と設計に関するヒントをエキスパートから迅速かつ直接得ることができる場所です。既存の回答を検索したり、独自の質問をしったりすることで、設計に必要な支援を迅速に得ることができます。

リンクされているコンテンツは、各寄稿者により「現状のまま」提供されるものです。これらはテキサス・インスツルメンツの仕様を構成するものではなく、必ずしもテキサス・インスツルメンツの見解を反映したものではありません。テキサス・インスツルメンツの[使用条件](#)を参照してください。

4.5 商標

テキサス・インスツルメンツの™, TinyEngine™, and テキサス・インスツルメンツ E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

Type-C® is a registered trademark of USB Implementers Forum.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

5 著者について

WILL TAI は、グリッド インフラのエネルギー ストレージ システムに特化したシステム エンジニアとして、電力変換システム、セル バランス、パック バランスの設計を担当しています。TI 入社前に、南京航空航天大学で電気工学の修士号を取得しました。

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みいかなる保証も、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、TI は一切の責任を拒否します。

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 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](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。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。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月