

Design Guide: TIDA-010236

家電製品向け 4kW GaN トーテムポール PFC のリファレンス・デザイン



概要

このリファレンス・デザインは、上面放熱型窒化ガリウム (GaN) ドーターボードと TMS320F280025C デジタル・コントローラを使った 4kW 連続導通モード (CCM) トーテム・ポール力率補正 (PFC) です。LMG352x と C2000 の統合型保護機能に加えて、包括的な保護機能が実装されています。AC 電圧降下、サージ、伝導エミッション (CE) は完全に検証済みであり、C2000 と GaN を使った、高コスト効率かつ高電力効率で堅牢なトーテムポール PFC 設計を実現しています。

リソース

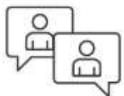
TIDA-010236	デザイン・フォルダ
LMG3522R030-Q1	プロダクト・フォルダ
TMS320F280025C	プロダクト・フォルダ
AMC3302	プロダクト・フォルダ
UCC28710	プロダクト・フォルダ
ISO77xx	プロダクト・フォルダ

特長

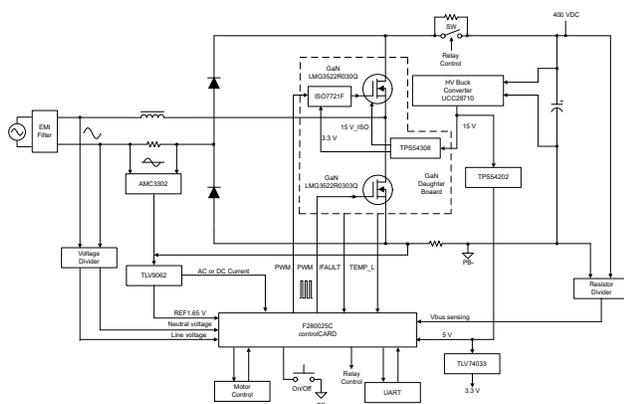
- 最大電力: 4000W (AC 200~277V)
- ピーク効率: 98.66% 以上、力率: 0.999
- 低速スイッチャとしてのダイオード・ブリッジ
- オンボードの高電圧補助降圧電源
- シングル・メイン・ヒートシンク設計
- OVP、UVP、OCP、OTP 保護機能、UART ハートビート・レポートを備えたデジタル PFC
- 伝導エミッション・テストに合格 (EN55032 Class B)

アプリケーション

- エアコン室外機
- HVAC (空調) モーター制御
- 単相オンライン UPS
- 主な家電製品
- 産業用 AC-DC



テキサス・インスツルメンツの TI 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

代表的な住宅用エアコン・システムは単相 AC 入力で動作し、電力レートは 4kW 未満です。力率と電流の全高調波歪 (iTHD) の要件を満たすには、PFC 段が必要です。

このリファレンス・デザインでは、テキサス・インスツルメンツの GaN と C2000、絶縁型電流センシング、差動電圧センシング、および絶縁型汎用非同期レシーバ・トランスミッタ (UART) 通信ポート、を使用した 4kW の単相 CCM トーテム・ポール・ブリッジレス PFC を示します。

1.1 主なシステム仕様

表 1-1. 主なシステム仕様

パラメータ	仕様
入力電圧 周波数	200 ~ 277VAC 47 ~ 63Hz
入力電流	20A _{RMS} 最大
出力電圧	400VDC
出力電流	10A 最大
電力定格	4kW (200VAC)
電流 THD	230VAC、4kW で 2% 以下
PFC インダクタ	480μH、直径 80mm、高さ 30mm、420g
出力容量	1000μF × 2
スイッチング周波数	最高 100kHz
GaN R _{DS(on)}	30mΩ (標準値)

2 システム概要

このシステムは TI C2000 TMDSCNCD280025C controlCARD をコントローラとして使用して、LMG3522030 をもつ独立した GaN ドーター・カードにより高速スイッチング・レグを実現し、ダイオード・ブリッジは低速スイッチング・レグとして動作します。システムの基準点が DC バス・マイナスであるため、回路設計が簡素化されます。

UCC28710 高電圧降圧電源が実装されており、15V の補助電圧レールを供給します。また、この設計では 1 つののメイン・ヒートシンクを使用しており、すべてのパワー・デバイスを簡単に取り付けることができます。

この設計では、TMS320F280025C と GaN の機能を活用し、入力低電圧保護 (UVP)、過電圧保護 (OVP)、過電流保護 (OCP) (ワンタイム・ショットとサイクル単位の両方)、GaN およびヒートシンクの過熱保護 (OTP) を含む、完全なハードウェアおよびソフトウェア保護を実装しています。これらの保護機能により、堅牢な PFC 設計が実現します。

フィルタ・ボードを分離した設計となっているため、さまざまなフィルタを使用して、EMI (電磁干渉) と EMC (電磁適合性) の性能を評価することができます。

絶縁型 UART 通信が実装されており、ボードの動作ステータスの概要をハートビートのように定期的にホスト・コンピュータにレポートし、ボードのステータスをわかりやすくします。

2.1 ブロック図

図 2-1 に、メイン・ボードのブロック図を示します。

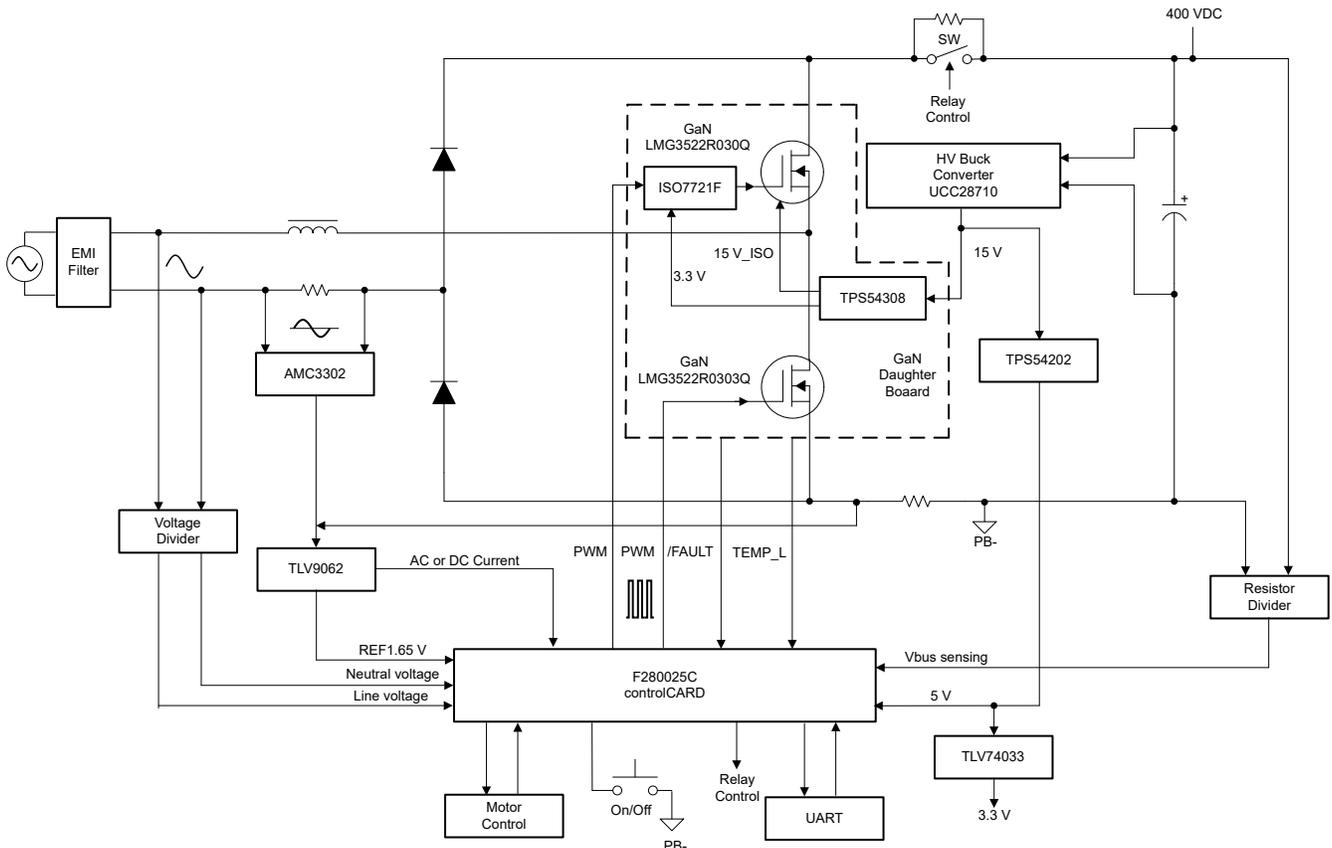


図 2-1. メイン・ボードのブロック図

図 2-2 に、GaN ドーターボードのブロック図を示します。

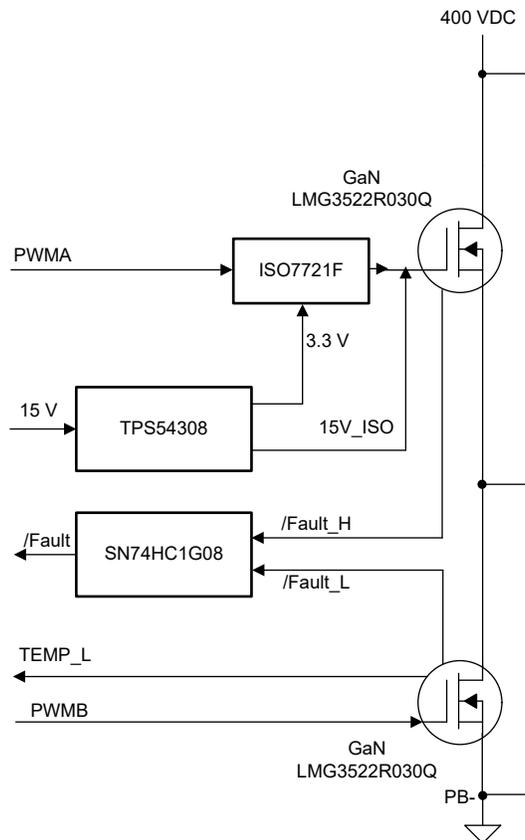


図 2-2. GaN ドーターボードのブロック図

図 2-3 に、フィルタ・ボードのブロック図を示します。

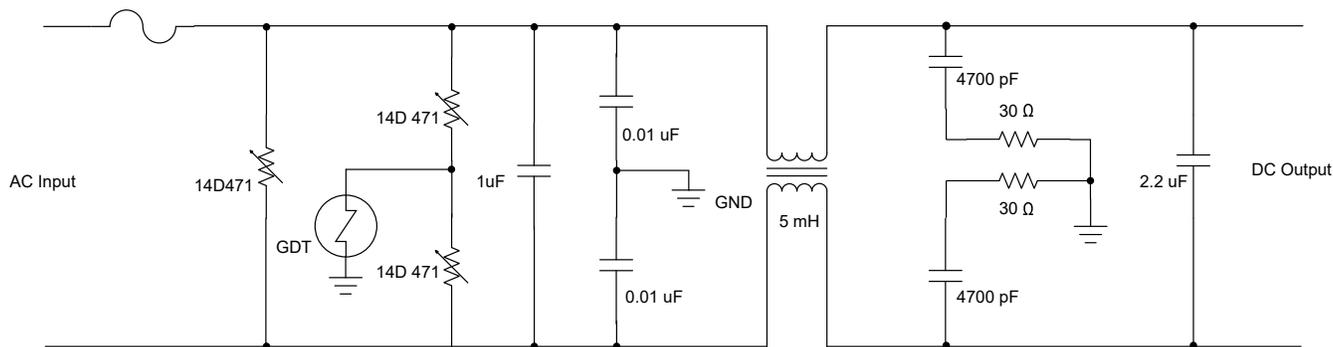


図 2-3. フィルタ・ボードのブロック図

2.2 設計上の考慮事項

デジタル電源設計には、出力段と制御段が含まれます。この設計における電力段の設計は、他のすべての昇圧 PFC 設計に似ています。図 2-4 に、電力段の設計パラメータを示します。

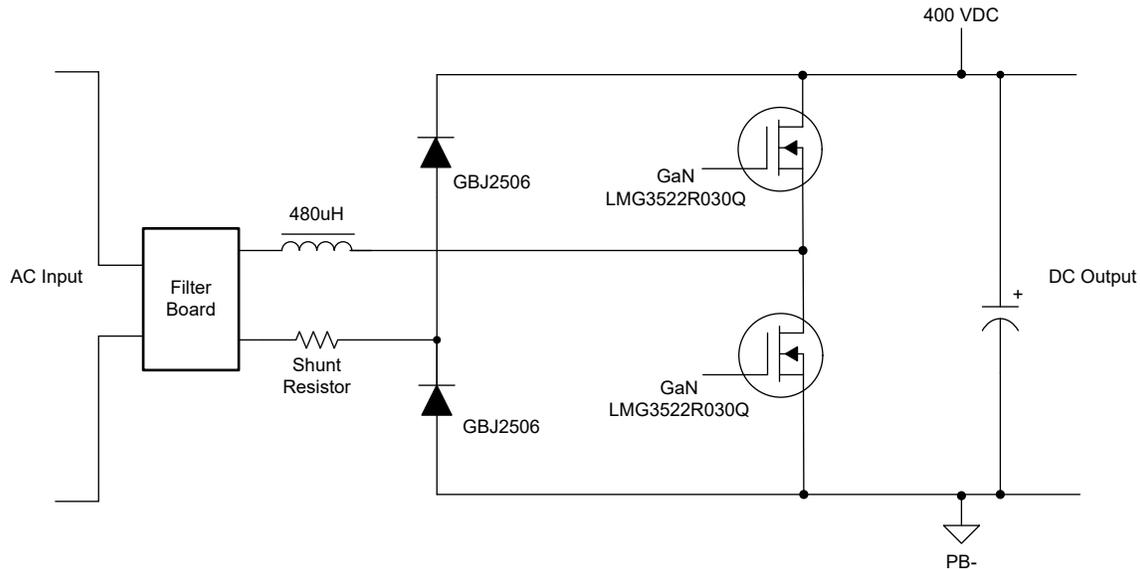


図 2-4. 電力段の設計パラメータ

2.2.1 6W 補助電源

この設計では、15V の電圧レールを供給するために UCC28710 を使用した高電圧降圧電源が実装されているので、外部補助電源は不要です。AC 入力は 70 ~ 277VAC が可能で、最大 400mA を出力できます。

2.2.2 AC 入力電流センシング

家電アプリケーションでは通常、DC マイナスがシステム全体の基準点となります。これは、コンプレッサとファン・モーターのインバータ用のインテリジェント・パワー・モジュール (IPM) が同じ基準点を維持する為です。ただし、PFC の AC 電流センシングには高い同相電圧が存在するため、絶縁型アンプ AMC3302 を実装しています。AMC3302 は 41 の固定ゲインを持ち、入力電圧範囲は $\pm 50\text{mV}$ です。一般的な同相モード出力電圧は 1.44V ですが、ADC の基準電圧は 3.3V なので、代替信号は 1.65V を中心とするように動く必要があり、このバイアスを供給するために追加のアンプ TLV9062 が実装されています。シャント抵抗は、2512 サイズの $0.002\ \Omega$ を 2 個、並列に接続して使用しています。AMC3302 のゲインは 41、TLV9062 のゲインは 0.72723 なので、全体のゲインは 29.818 です。最終的な入力電流センス比は 0.029818V/A 、入力電流センシング範囲は $-55.34\text{A} \sim +55.34\text{A}$ です。

2.2.3 DC バス電圧センシング

DC マイナスはシステムの基準点なので、DC バス電圧のセンシングは非常に単純です。高い DC 電圧を 3.3V 程度まで減衰させるために抵抗を使用するだけです。この設計では、DC バス電圧センス比は 0.005125、電圧センシング範囲は $0\text{V} \sim 644\text{V}$ です。

2.2.4 AC 入力電圧センシング

システム・コストを制限するには、AC 入力電圧センシングに抵抗ネットワークを使用します。DC マイナスを基準としてラインとニュートラルの両方が抵抗によって減衰するため、減衰した 2 つの信号の減算が AC 入力電圧となります。

2.2.5 GaN の駆動

この設計では、スイッチング・レグとして独立したハーフブリッジ GaN ドーターボードを採用しているため、メイン・ヒートシンクへの搭載設計が容易になっています。下側 GaN は DSP に直接接続します。一方、上側 GaN は基準点が DSP と異なるので、アイソレータ ISO7721F を必要とします。また、このアイソレータは絶縁型 GaN フォルト信号をマイコンに送信し、ワンショット・トリガ保護を実現します。

上側 GaN に電力を供給するには TPS43208 デバイス付きのフライバック補助電源を実装し、上側 GaN に絶縁型 15V レールを供給します。この電源は ISO7721F への非絶縁型 3.3V レールと SN74AHC1G108 の AND ゲートも生成し、上側、下側両方の GaN からフォルト信号を収集してその情報を DSP にレポートします。

下側 GaN の温度信号もデジタル信号プロセッサ (DSP) に送信され、接合部温度の測定値を与えます。

2.2.6 パワーオン時の突入電流保護

DC バス上の 2 つのバルク・コンデンサは、電源オン時に大きな突入電流を引き起こします。この設計では、50Ω の PTC とリレーが連動して、この突入電流を制限します。電源投入後、指定された遅延時間内に、ソフトウェアによりリレーが閉じます。

注

電源投入時にはすべての負荷電流が PTC を流れるため、DC バスに大きな負荷をかけないでください。DC 負荷が大きい (800Ω 未満) と、PTC 保護がトリガされます。PTC 保護がトリガされると、冷却後にトリガが解放されるのを待ちます。

2.2.7 過電流保護

この設計では 3 種類の電流保護があります。

サイクル単位の電流保護: TMS320F280025C にはウィンドウ・コンパレータ付きのコンパレータ・サブシステム (CMPSS)、が搭載されており、正と負、両方の半サイクルで過電流を保護できます。この設計では、40A の電流に設定されたソフトウェアにより CMPSS をトリガします。CMPSS はサイクル単位の保護として設定されています。

GaN 過電流保護: GaN は過電流時にフォルト信号をプルダウンします。上側と下側のフォルト信号を AND 処理して TMS320F280025C にレポートし、PWM を停止するトリップ・ゾーン (TZ) 信号を生成します。これはワンショット・トリップ保護です。LMG3522R030 の標準的なドレイン過電流は 70A です。

過負荷電流保護: ソフトウェアは AC 入力電流を監視し、負荷電流が大きすぎる場合は PFC を停止します。この設計ではソフトウェアで過負荷電流を $26A_{RMS}$ に設定しています。

2.2.8 AC 入力低電圧保護

入力電圧が低すぎる場合、ソフトウェアは PFC を起動しません。この設計では、ソフトウェアは 170VAC に設定されています。

2.2.9 DC バス過電圧保護

CMPSS モジュールは、DC バス過電圧保護用に設定されています。トリガ電圧は 440VDC です。

2.2.10 GaN 温度監視および保護

LMG3522R030 は、パルス幅変調 (PWM) モードで自らの TEMP ピンの温度をレポートします。TMS320F280025C の拡張キャプチャ (eCAP) モジュールは、この PWM 信号を監視するように構成されています。ソフトウェアはこの比率をキャプチャし、GaN 過熱保護を決定します。この設計では、125°C で GaN の過熱と判断して PFC が停止します。

2.2.11 ヒートシンク温度監視および保護

ヒートシンクの温度を監視するために、負の温度係数 (NTC) をもつサーミスタをヒートシンクに取り付けています。この設計では、ヒートシンクの温度が 80°C を上回ると PFC を停止します。

2.2.12 UART ハートビート・レポート

絶縁型 UART は 1 秒ごとにボードの動作ステータスをレポートします。次の情報をレポートします。

- GaN 温度デューティ
- 温度
- ヒートシンクの温度
- 入力電圧
- 入力電流
- 入力電力
- 出力電圧
- エラー
- 合計動作時間
- ファームウェア・バージョン

UART のボーレートは 115200bps で、ASCII モードです。

2.2.13 モーター制御インターフェイス

TMS320F280025C には、PFC とモーター・インバータを同時に制御する機能があります。この設計では、モーター信号が J10 と J11 の 2 つのコネクタに予約されています。

2.3 主な使用製品

2.3.1 LMG352xR030

ドライバおよび保護機能を内蔵した LMG352xR030 GaN FET を使うと、設計者はパワー・エレクトロニクス・システムにおいて、比類ない電力密度と効率を実現できます。

LMG352xR030 は、最大 150V/ns のスイッチング速度を実現できるシリコン・ドライバを内蔵しています。テキサス・インスツルメンツの統合型高精度ゲート・バイアスは、ディスクリート・シリコン・ゲート・ドライバと比較して、より広いスイッチング安全動作領域 (SOA) をもたらします。この統合と低インダクタンス・パッケージの組み合わせにより、ハード・スイッチング電源トポロジでもノイズの少ないスイッチングとリングングの最小化を実現できます。EMI を制御するための調整可能なゲート・ドライブ強度、過熱保護、フォルト表示付きの堅牢な過電流保護を含むその他の機能を使うと、BOM コスト、基板サイズ、フットプリントを最適化できます。

先進の電源管理機能にはデジタル温度レポート機能とテキサス・インスツルメンツの理想ダイオード・モードが含まれます。GaN FET の温度は可変デューティ・サイクル PWM 出力により通知されるため、システムは負荷を管理できます。理想ダイオード・モードは、適応型デッドタイム制御により第 3 象限の損失を低減することで効率を最大化します。

2.3.2 TMS320F28002x

TMS320F28002x (F28002x) 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含め、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・マイコン・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 100MHz の信号処理性能を発揮します。C28x CPU は、三角関数演算ユニット (TMU) と 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重要なアルゴリズムを高速化します。

F28002x リアルタイム・マイコン (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・チェーン性能を提供するため処理および PWM ユニットと密結合されています。14 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。

2.3.3 UCC2871x

UCC2871x フライバック電源コントローラ・ファミリーは、オプトカプラを使用せず、絶縁出力の定電圧 (CV) および定電流 (CC) 出力レギュレーションを行います。1 次側電源スイッチおよび補助フライバック巻線からの情報を処理することで、出力電圧および電流を精密に制御します。

駆動出力は、MOSFET 電力スイッチに接続されます。バレー・スイッチングによる不連続導通モード (DCM) 動作でスイッチング損失が低減されます。スイッチング周波数の変調 (FM) および 1 次側電流のピーク振幅の変調 (AM) により、負荷およびライン範囲の全体にわたって高い変換効率を保持します。コントローラの最大スイッチング周波数は 100 kHz で、変圧器内でピーク 1 次側電流の制御が常に維持されます。1 次および 2 次部品のストレスを抑制する保護機能も備えています。

2.3.4 TLV906x

TLV906x は、レール・ツー・レールの入出力スイング能力を持つオペアンプです。これらのデバイスは、低電圧での動作、小さな占有面積、大きな容量性負荷の駆動が必要なアプリケーション向けの、コスト効率の優れた設計です。**TLV906x** の容量性負荷駆動能力は 100pF ですが、開ループ出力インピーダンスは抵抗性なので、これより大きい容量性負荷も容易に安定化できます。これらのオペアンプは低電圧(1.8V ~ 5.5V)で動作し、**OPAx316** および **TLVx316** デバイスと同様の性能仕様を満たすよう、特別に設計されています。

2.3.5 TPS54308

TPS54308 は入力電圧範囲が 4.5V ~ 28V で、3A の同期整流降圧コンバータです。このデバイスには 2 つの内蔵スイッチング FET、内部的なループ補償、および 5ms の内部ソフトスタートが搭載されているため、部品数を減らすことができます。**PS54308** には MOSFET が内蔵され、SOT-23 パッケージを採用しているため、高い電力密度を実現し、PCB 上でわずかな面積しか占有しません。

軽負荷状態では、**TPS54308** は強制連続導通モード (FCCM) で動作します。スイッチング周波数は、負荷範囲全体にわたってほぼ一定のレベルに維持されます。従って、このデバイスは今回の設計で使用する Flybuck トポロジに最適で、両方のハイサイド MOSFET でサイクル単位の電流制限を行い、過負荷の状況でコンバータを保護します。また、ローサイド MOSFET の電流制限を自由に設定でき、電流暴走を防止することで、さらに保護が強化されています。プリセット時間を上回る長さで過電流状態が続いた場合、ヒックアップ・モード保護機能をトリガします。

3 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、テスト結果

このセクションでは、ハードウェアの詳細について解説し、ボード上のさまざまなセクションと、この設計ガイドで説明しているように、実験用にそれらを設定する方法について説明します。

3.1 ハードウェア要件およびアセンブリ

この設計は、ヒートシンク、GaN ドーターボード、メイン・ボード、フィルタ・ボードの 4 つの部品で構成されています。図 3-1 にキットの側面図を示し、図 3-2 にヒートシンク、GaN ドーターボード、メイン・ボードの相対位置を示します。GaN ドーターボードの底面に 2 個の上面冷却 GaN LMG3522R030 デバイスを採用しており、ヒートシンクとダイオード・ブリッジを使用してデバイスを冷却することができます。キットは通常、完全に組み立てられた状態で出荷されますが、組み立て手順を以下に列記します。

1. ヒートシンクの角に M3 × 10mm のスタンドオフ 5 個 (片方の端部は外側に 3mm のネジが切っただけであるオスネジ、反対側の端部は内側に 3mm のネジが切っただけであるメスネジ) を取り付けます。
2. GaN ドーターボードの下のヒートシンクにサーマル・インターフェイス・マテリアル (TIM) (この設計では厚さ 0.5mm の Fujipoly GR80A-0H-050GY) を接着し、TIM が十分大きく、GaN ドーターボードの下部ピンおよびトレースより少なくとも 3mm はみ出すようにします。ただし、4 つの機械穴には、TIM が無い部分が直径 7mm が必要です。
3. 底面の 4 個のスタンドオフがヒートシンクの 4 つの機械的な取り付け穴の位置に合うように、ヒートシンク上で GaN ドーターボードの位置を決めます。4 本の M3 × 6mm のネジを GaN ドーターボードからヒートシンクに固定します。
4. ダイオード・ブリッジの底面側に熱グリースを塗布します。
5. ヒートシンクの温度プローブを M3 × 4mm のネジでヒートシンクに固定します。
6. GaN ドーターボードの J2 とメイン・ボードの J4 の位置合わせを行うと、J4 の底面の穴から J2 を J4 にスライドして入れることができます。
7. メイン・ボードの角の穴をヒートシンクの 5 個のスタンドオフの位置に合わせ、M3 × 8mm のネジで固定します。
8. ダイオード・ブリッジの穴をヒートシンクの対応する穴の位置に合わせ、M3 × 8mm のネジでダイオード・ブリッジをヒートシンクに固定します。
9. メイン・ボードの穴 (HV、SW、GND) から GaN ドーターボードの MP1、MP4、MP7 スタンドオフに 3 本の M3 × 6mm のネジを取り付けます。これら 3 本のネジは、GaN ドーターボードとメイン・ボードの間の大電流経路としても機能します。
10. メイン・ボード (J1、J2、J3) をフィルタ・ボード (J2、J4、J10) にハーネスで接続します。
11. メイン・ボードの J5 と J7 に DC 出力ケーブルを接続します。
12. フィルタ・ボードの J1、J3、J5 に AC 入力ケーブルを接続します。

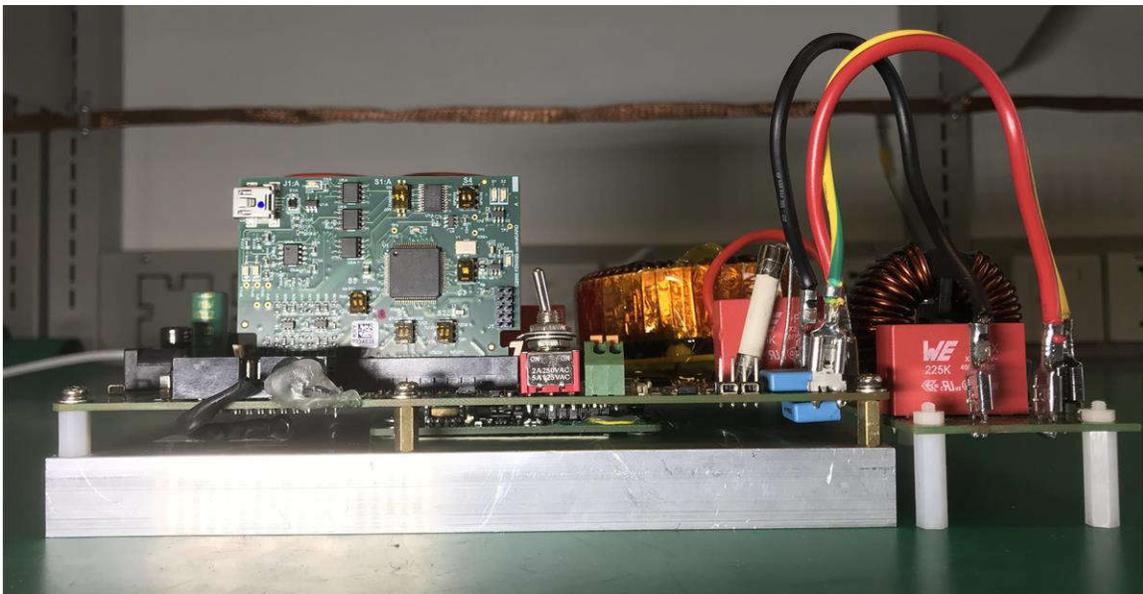


図 3-1. TIDA-010236 リファレンス・デザインの側面図

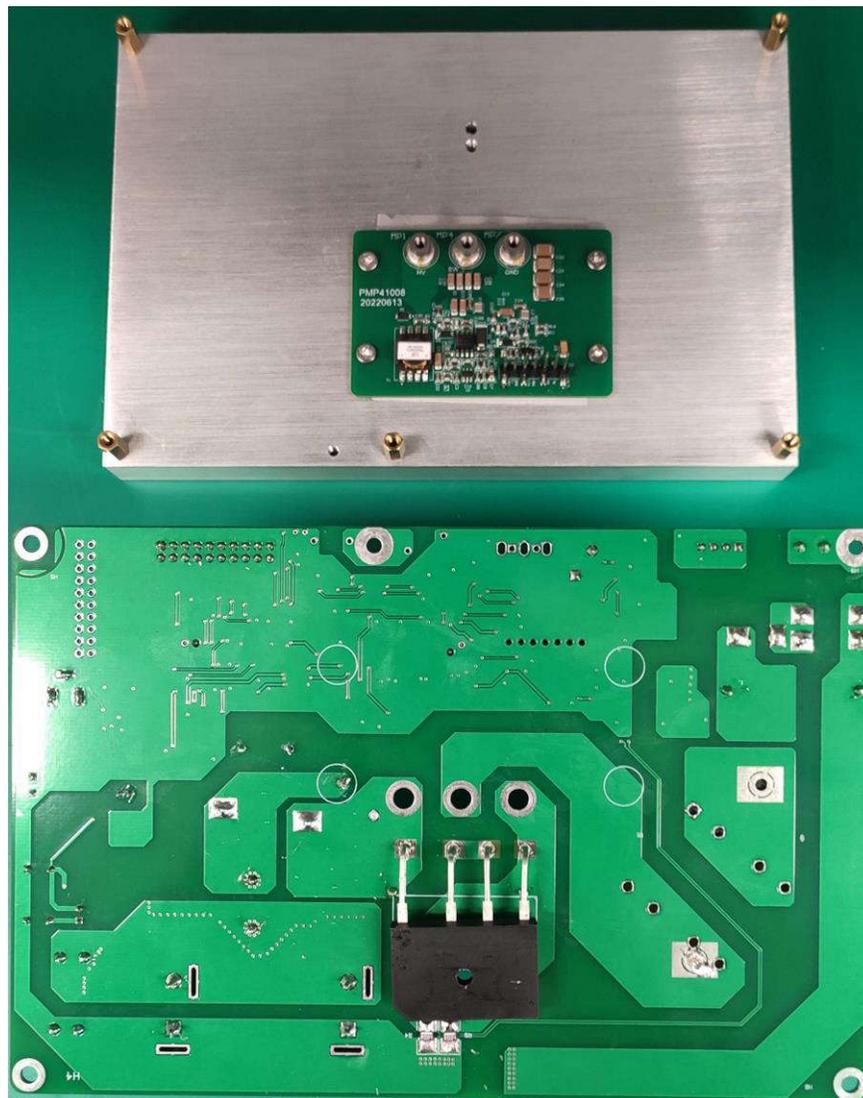


図 3-2. ヒートシンク、GaN ドーターボード、メイン・ボード

3.1.1 テスト装置要件

1. プログラマブル AC 電源 (4kVAC 以上)
2. 絶縁型高電圧 DC 負荷 (400VDC、4kW 以上)
3. 空冷ファン
4. ホスト PC またはラップトップ (USB ポート付き)

3.2 ソフトウェア要件

このリファレンス・デザインには、次のソフトウェア要件があります。

1. ファームウェア TIDA-010236_FW_V1.01 を搭載した、フラッシュ TMS320F280025C controlCARD
2. ホスト PC 上の UART 端末ソフトウェア

3.3 テスト構成

テストをセットアップするには、次の手順を実行します。

1. TMS320F280025C controlCARD ボードがメイン・ボードの J9 に適切に挿入され、ロックされていることを確認します。
2. USB ケーブルを TMS320F280025C controlCARD からホスト PC に接続します。

3. PC で任意の UART 端末ソフトウェアを実行し、正しい UART ポートを 115200bps の ASCII モードに設定します。
4. AC 電源ケーブルをメイン・ボードの入力端子 J1 と J3 に接続します。ただし、電源は投入しないでください。
5. DC 負荷を出力端子 J5 および J7 に接続します (J5 は DC 正、J7 は DC 負、負荷はグリッドおよび PE ラインと絶縁する必要があります)。
6. 強制空冷ファンを使用してヒートシンクを冷却します。
7. 必要に応じて、電流/電圧計、または電力アナライザを接続します。



図 3-3. テスト構成

3.4 テスト結果

3.4.1 テスト手順

図 3-4 に、テスト対象機器 (EUT) のセットアップを示します。

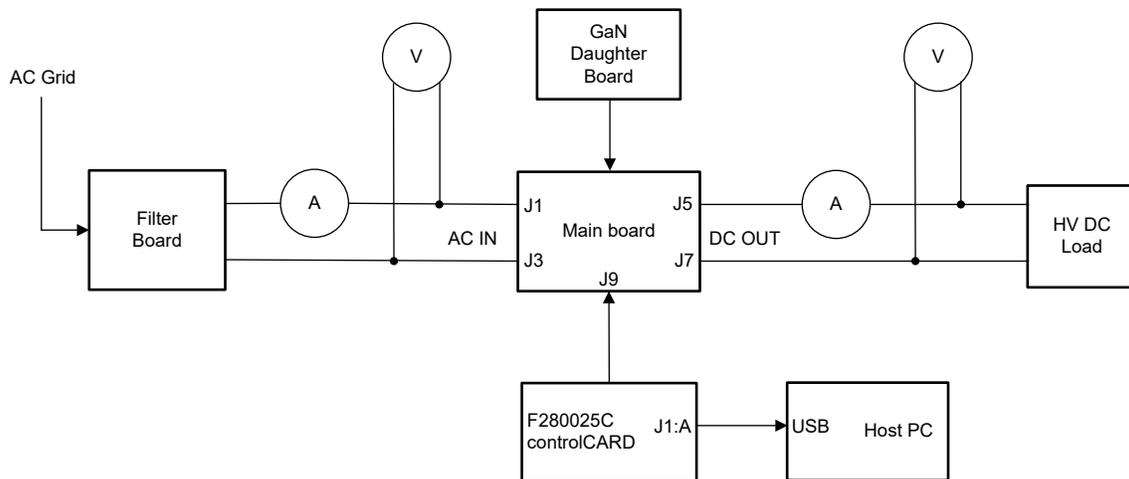


図 3-4. EUT の設定

3.4.1.1 90VAC でのテスト手順

90VAC でのテストをセットアップするには次の手順を実行します。

1. 800 Ω を超える電力抵抗、あるいは 0.5A 未満の負荷電流の DC 出力を負荷として印加します。
2. AC 電源を 90VAC、50Hz または 60Hz に設定してから電源を入れます。

3. ホスト PC で UART ターミナル・ソフトウェアを確認します。ハートビート・レポートが検出されなくてはなりません。ボードのステータスは、低電圧保護 (UVP) でなくてはなりません。
4. AC 電源をオフにします。

3.4.1.2 220VAC でのテスト手順

220VAC でのテストをセットアップするには次の手順を実行します。

1. 800 Ω を超える電力抵抗、あるいは 0.5A 未満の負荷電流の DC 出力を付加として印加します。
2. AC 電源を 220VAC、50Hz または 60Hz に設定してから電源を入れます。PFC が開始し、DC 出力電圧は 400VDC になります。
3. UART 端末ソフトウェア、UART の情報および波形を確認します。
4. 4kW に達するまで、負荷を段階的に増加させます。
5. AC 電源をオフにします。

3.5 性能データ: 効率、iTHD、力率

図 3-5 に、関連する 230VAC の効率曲線を示します。

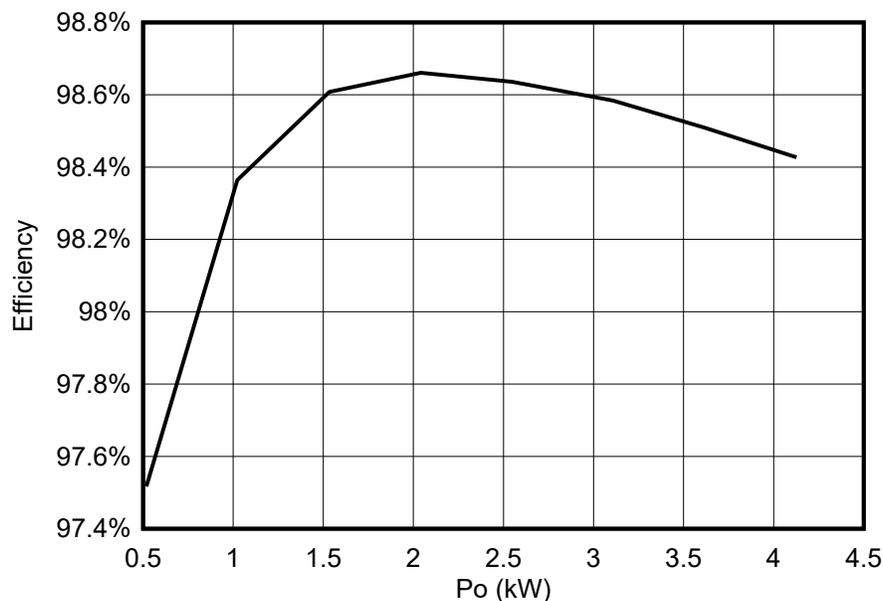


図 3-5. 230VAC における効率曲線

表 3-1 に、230VAC 入力での効率、iTHD、力率のデータを示します (制御機能や駆動電力損失は除外)。

表 3-1. 230VAC 入力での効率、iTHD、力率データ

V _{IN} /V	I _{IN} /A	P _{IN} /kW	V _{OUT} /A	I _{OUT} /A	P _{OUT} /kW	効率	iTHD	PF
229.71	2.3875	0.5179	399.37	1.2643	0.5050	97.517%	18.383%	0.9443
229.45	4.5206	1.0230	399.44	2.5190	1.0063	98.364%	9.420%	0.9863
229.18	6.7310	1.5339	399.41	3.7863	1.5125	98.608%	6.125%	0.9943
228.91	8.9450	2.0415	399.44	5.0417	2.0142	98.661%	4.379%	0.9970
228.64	11.1670	2.5486	399.43	6.2920	2.5138	98.636%	3.375%	0.9982
228.34	13.6240	3.1073	399.45	7.6670	3.0663	98.584%	2.739%	0.9988
228.06	15.8710	3.6163	399.47	8.9160	3.5624	98.509%	2.353%	0.9991
227.78	18.1300	4.1267	399.47	10.1650	4.0618	98.427%	2.000%	0.9993

図 3-6 に、200VAC および 277VAC の効率曲線を示します。

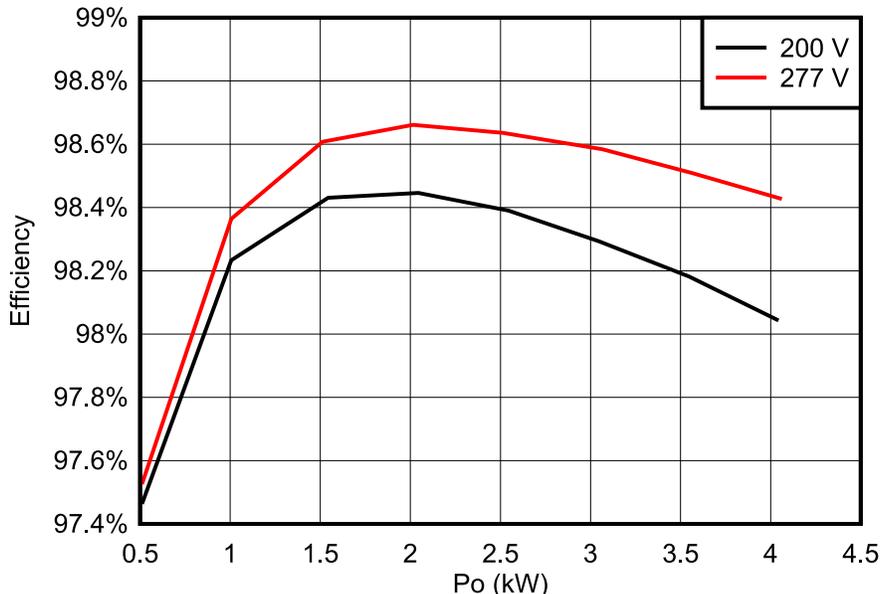


図 3-6. 200VAC と 277VAC の効率曲線

表 3-2 および 表 3-3 に、200V と 277V の入力での効率を示します (制御電力と駆動電力は除外)。

表 3-2. 200VAC 入力時の効率

P _{IN} /kW	V _{OUT} /V	I _{OUT} /A	P _{OUT} /kW	効率
0.5165	399.48	1.2598	0.5033	97.452%
1.0240	399.48	2.5177	1.0059	98.233%
1.5679	399.47	3.8630	1.5433	98.431%
2.0767	399.49	5.1170	2.0433	98.446%
2.5858	399.49	6.3680	2.5442	98.390%
3.0998	399.49	7.6250	3.0469	98.293%
3.6121	399.50	8.8750	3.5464	98.182%
4.1243	399.50	10.1190	4.0436	98.043%

表 3-3. 277VAC 入力時の効率

P _{IN} /kW	V _{OUT} /V	I _{OUT} /A	P _{OUT} /kW	効率
0.5167	399.44	1.2630	0.5046	97.657%
1.0217	399.35	2.5206	1.0068	98.538%
1.5302	399.36	3.7850	1.5116	98.787%
2.0353	399.30	5.0390	2.0125	98.877%
2.5401	399.30	6.2900	2.5121	98.898%
3.0892	399.24	7.6490	3.0545	98.876%
3.5941	399.18	8.8970	3.5524	98.839%
4.0985	399.17	10.1410	4.0490	98.794%

3.6 機能波形

3.6.1 90VAC、800Ω 負荷でのテスト

図 3-7 に 90VAC、800Ω 負荷での DC 出力波形を示します。チャンネル 2 は AC 入力電圧、チャンネル 3 は DC 出力電圧、チャンネル 4 は AC 入力電流です (特に記述のない限り、オシロスコープのチャンネルは以下同じです)。入力電圧が 170V 未満なので PFC は起動しません。

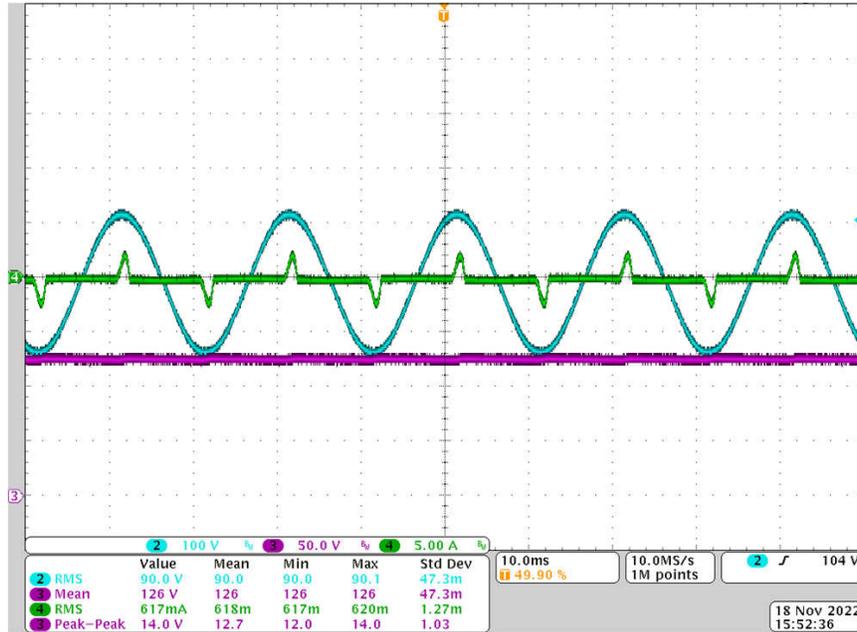


図 3-7. 90VAC、800Ω 負荷での波形

3.6.2 220VAC でのパワーオン・シーケンス・テスト

図 3-8 に、220VAC でのパワーオン・シーケンスを示します。パワーオンは PTC 突入電流制限ステップから開始し、その後リレーが作動します。PFC は最後のステップでゆっくりと起動します。

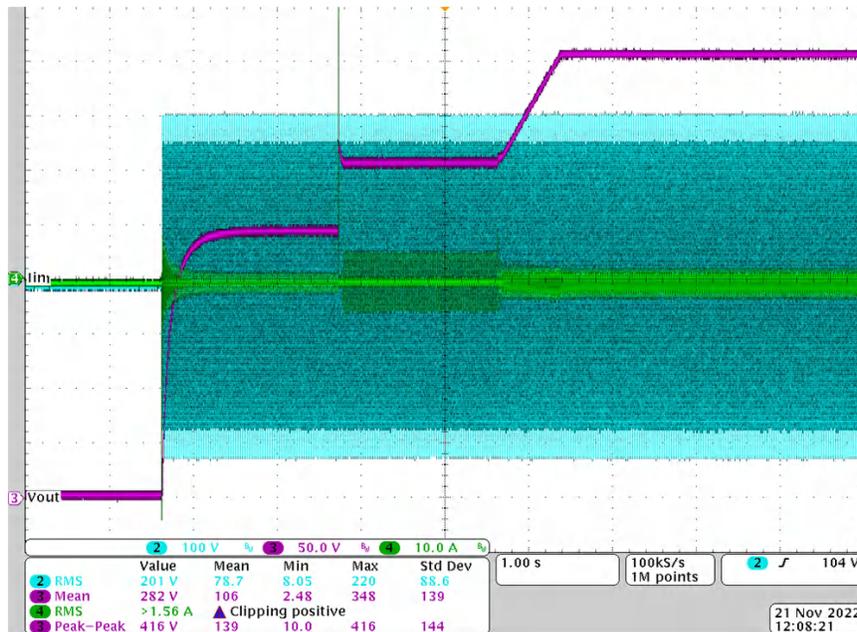


図 3-8. 220VAC 入力でのパワーオン・シーケンス

3.6.3 重負荷時の波形

220VAC 入力での 2kW 負荷の波形を 図 3-9 に示します。

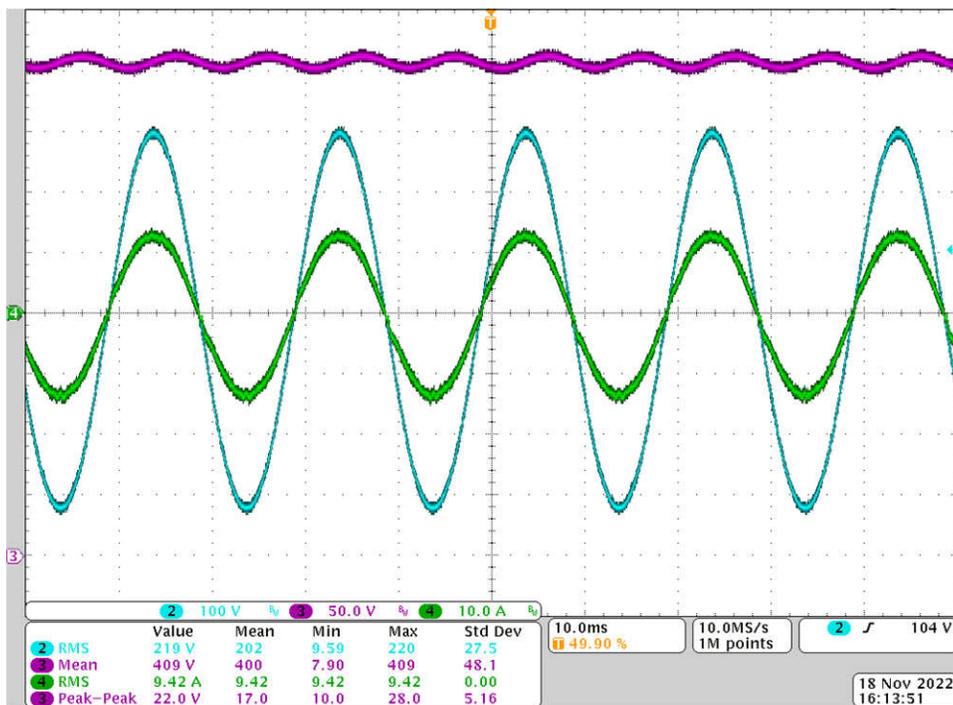


図 3-9. 220VAC、2kW での波形

220VAC 入力での 4kW 負荷の波形を 図 3-10 に示します。

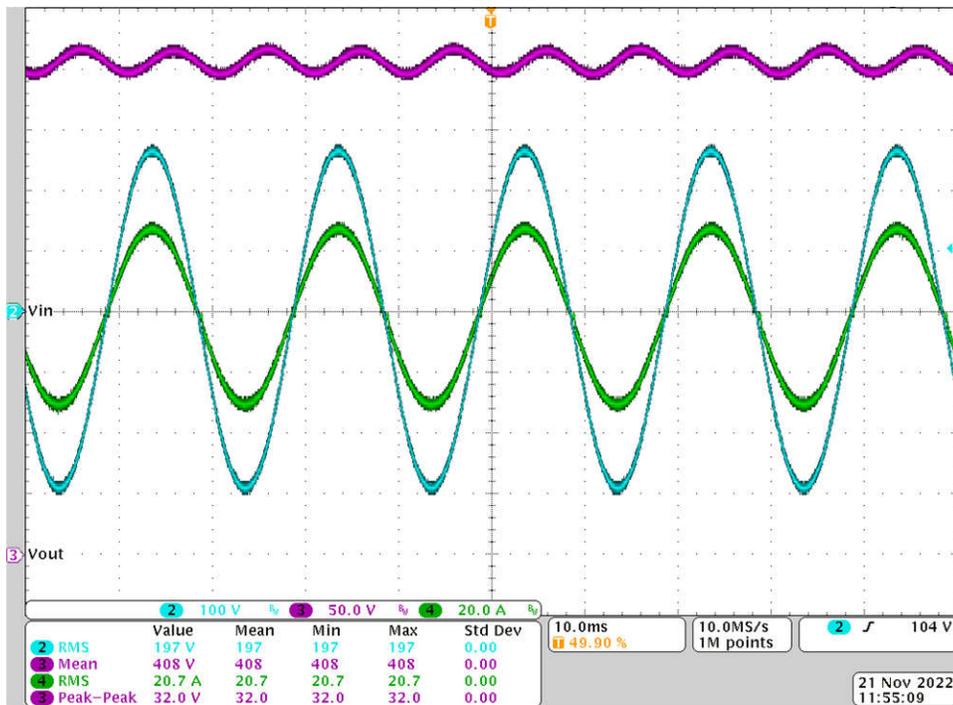


図 3-10. 220VAC、4kW での波形

3.6.4 補助降圧電源のテスト

図 3-11 に、降圧電源の波形を示します。チャンネル 1 は 15V 電圧レール、チャンネル 3 は UCC28710 のピン 4 のスイッチング・ノードです。

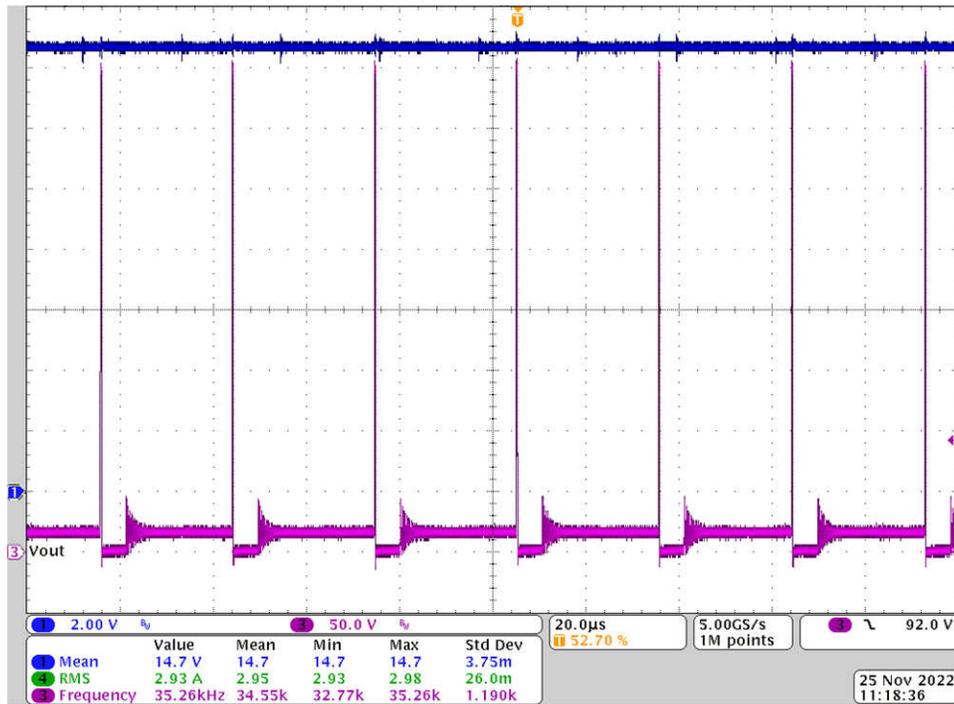


図 3-11. 降圧電源の波形

図 3-12 に、15V、400mA での降圧インダクタの温度上昇を示します。



図 3-12. 降圧インダクタ L8 の温度上昇

3.6.5 AC 電圧降下テスト

図 3-13 に、AC 電圧が回復した後の、90°、持続時間 10ms の AC 電圧降下を示します。PLL は AC 入力と同じ位相になるよう、さらに時間が必要で、DC バス電圧が大幅に降下し PLL の位相がずれているため突入電流が発生します。この時点で、サイクル単位の電流保護が動作を開始し、GaN を過電流 (この設計では 40A) から保護します。

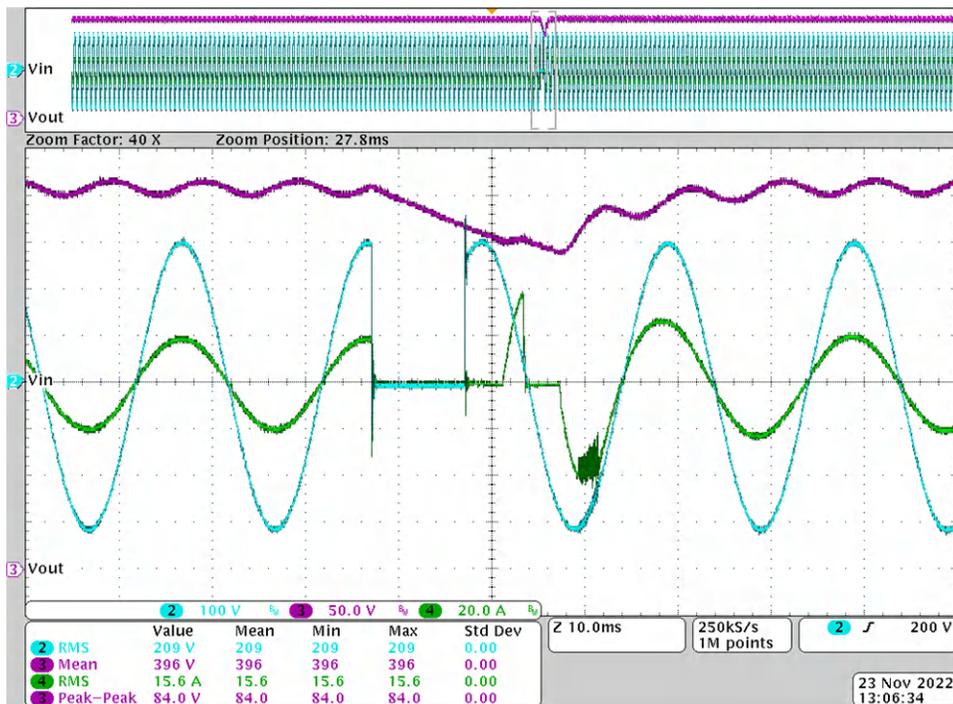


図 3-13. 90°、持続時間 10ms の AC 電圧降下

図 3-14 に、45°、持続時間 10ms の AC 電圧降下を示します。サイクル単位の電流保護も機能します。

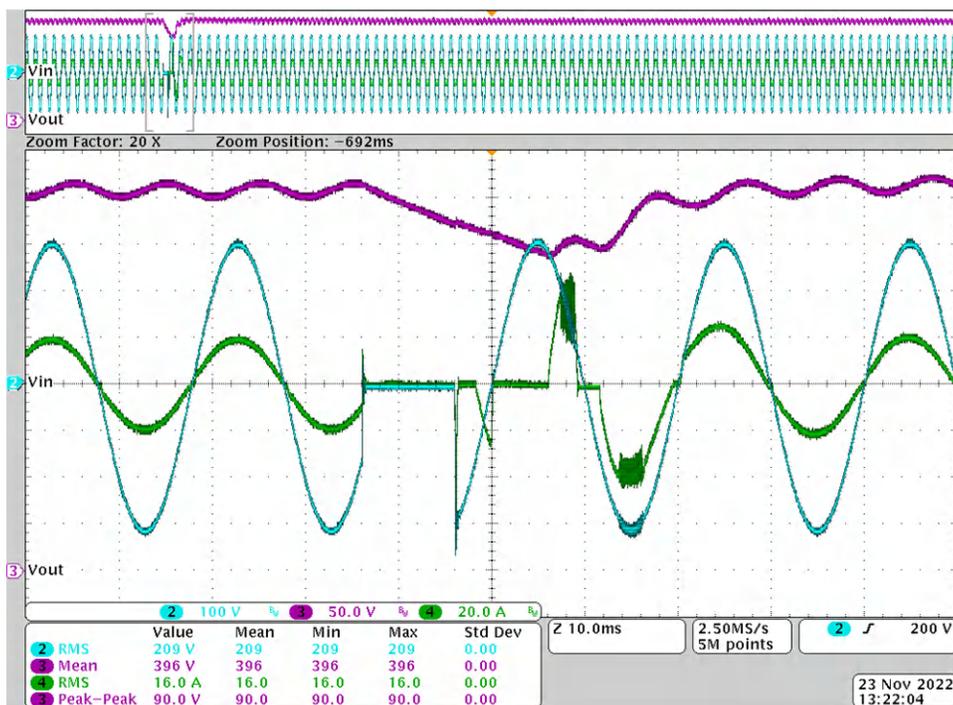


図 3-14. 45°、持続時間 10ms の AC 電圧降下

3.6.6 GaN スイッチング性能

図 3-15 に、400VDC、2.5kW 負荷での GaN の立ち上がりエッジを示します。

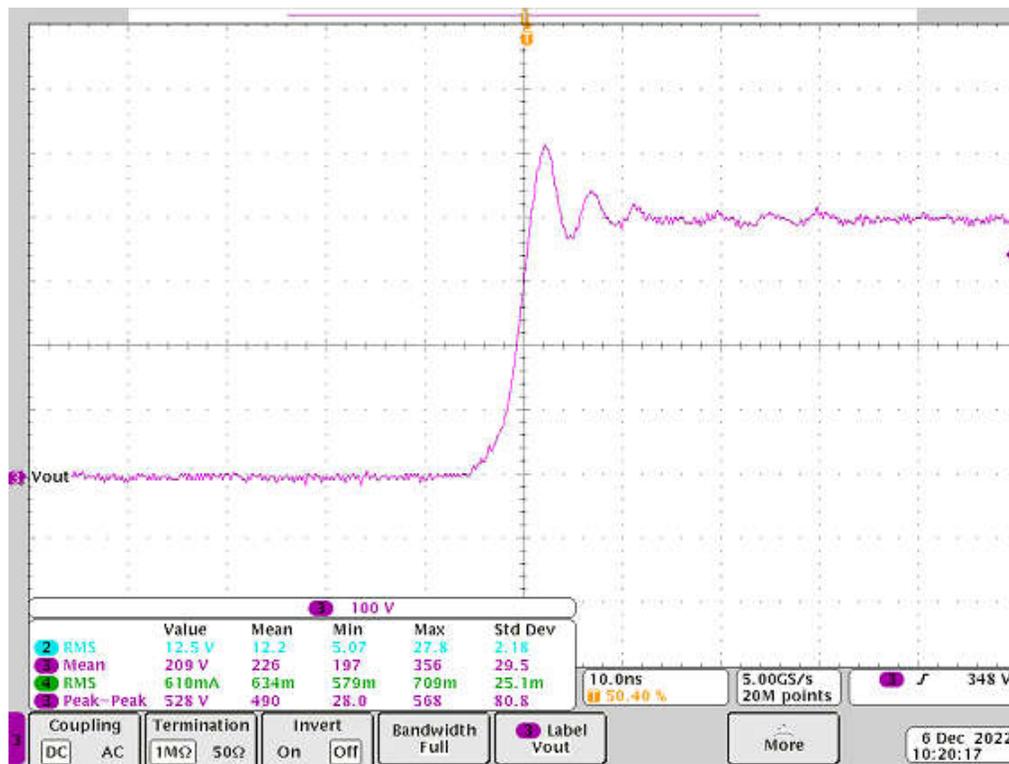


図 3-15. VDS、2.5kW 負荷での GaN の立ち上がりエッジ

図 3-16 に、400VDC、2.5kW 負荷での GaN の立ち下がりエッジを示します。

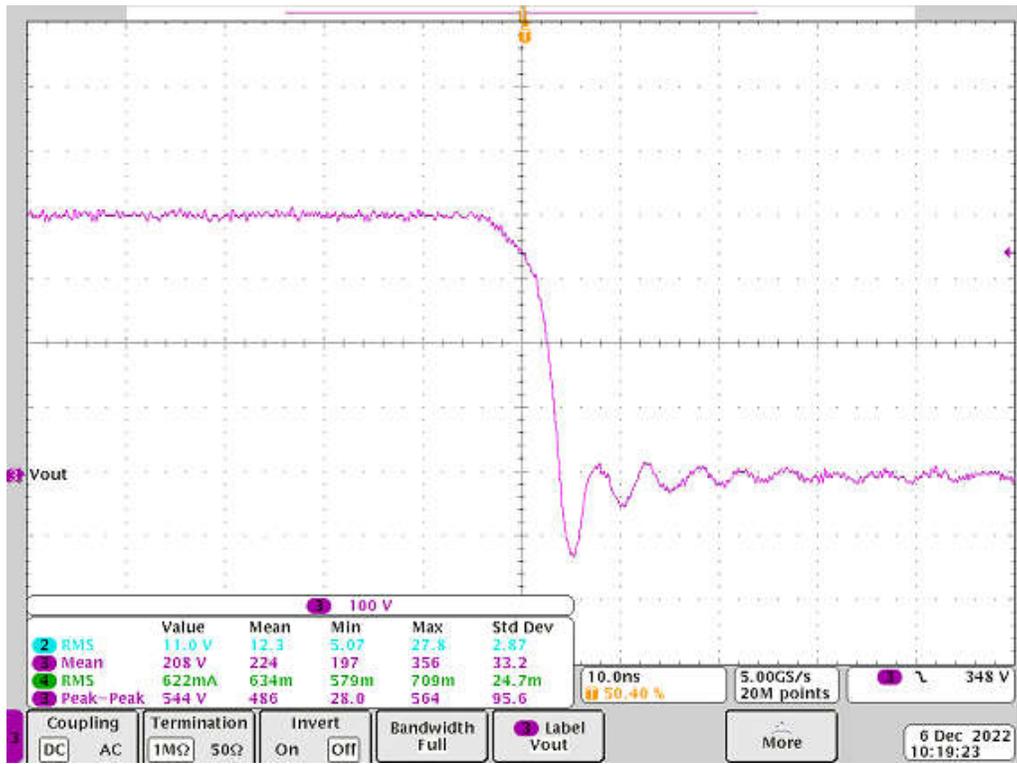


図 3-16. VDS、2.5kW 負荷での GaN の立ち下がリエッジ

3.6.7 温度テスト

この設計の熱性能は検証済みです。条件を次に列記します。

- 200VAC、4kW 負荷
- 冷却ファン: 27CFM、24V、2.64W
- 15 分後に熱平衡に到達
- 周囲温度は 25°C

図 3-17 に温度上昇テストのセットアップを示します。

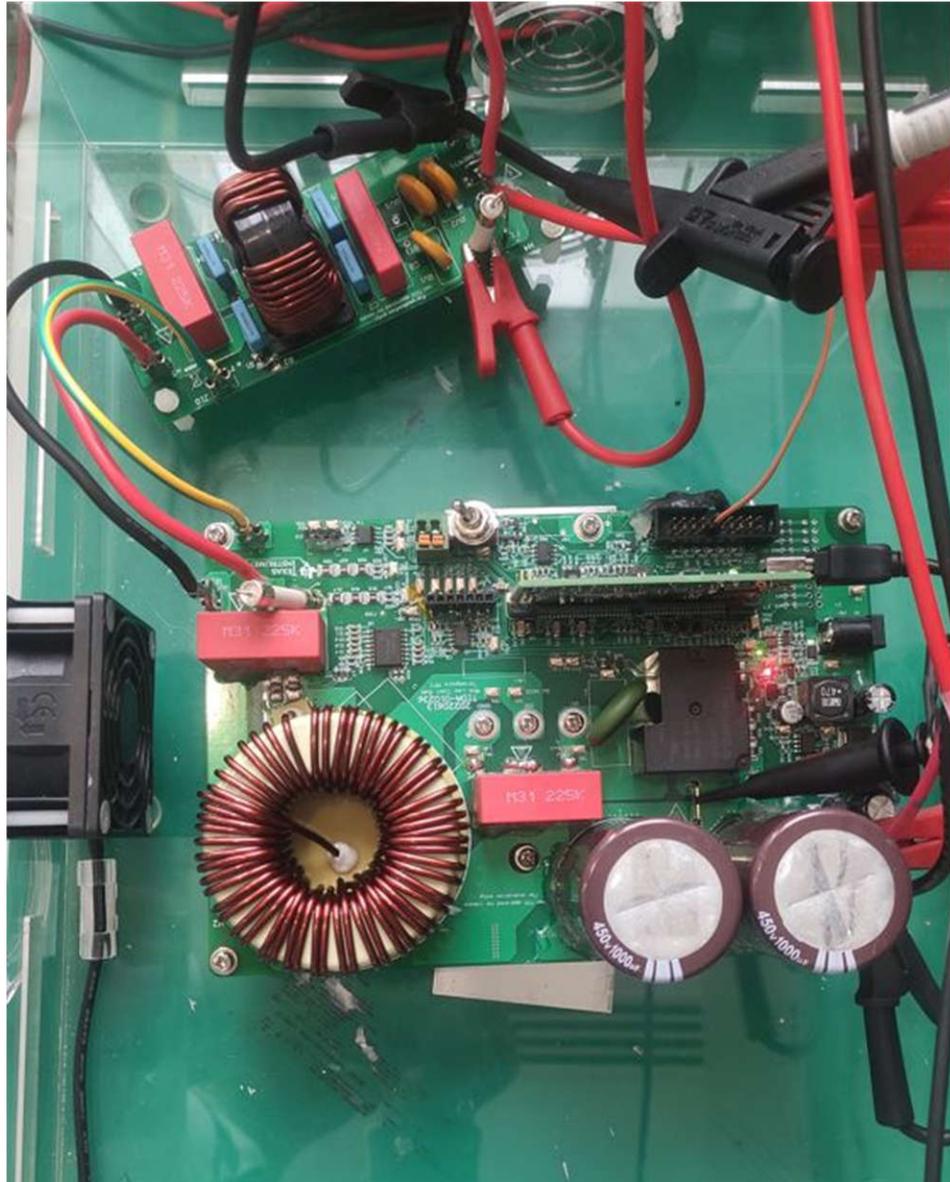


図 3-17. 温度テストのセットアップ

図 3-18 は 200VAC、4kW での昇圧インダクタの温度で、温度上昇が $69.6^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 44.6^{\circ}\text{C}$ であることを示しています。

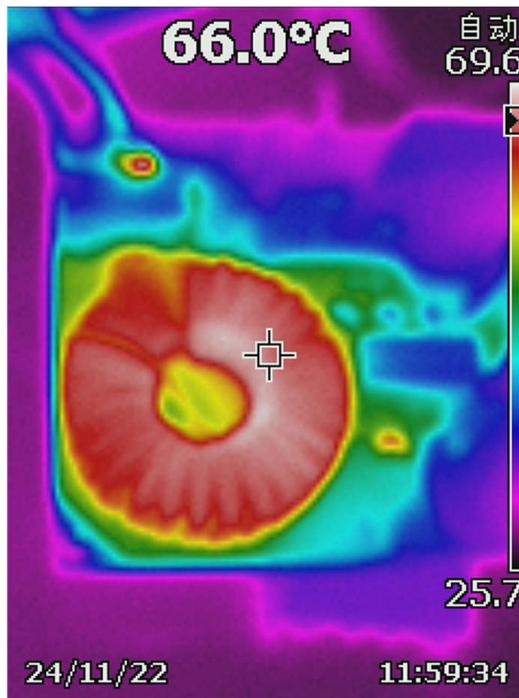


図 3-18. ブースト・インダクタ温度

GaN ドーターボードはメイン・ボードの下にあるため、サーマル・イメージャを使用して GaN の温度上昇を測定するのは困難です。しかし、GaN は PWM モードで TEMP ピンの温度をレポートし、PWM デューティ比が温度を表します。ファームウェアは PWM のデューティ比を監視し、温度を計算して、この情報を UART ポート経由でホスト PC にレポートします。図 3-19 は UART 端末のハートビート・レポートですこのレポートでは GaN の温度を読み取ることができます。

AC 入力電圧がさらに低い一部のアプリケーションでは入力電流がより高くなるため、GaN、ダイオード・ブリッジ、昇圧インダクタの温度上昇はさらに大きくなります。ユーザーは、これらのデバイスの温度上昇を完全に評価し、デバイスが十分な温度上昇マージンを確保できていることを確認する必要があります。

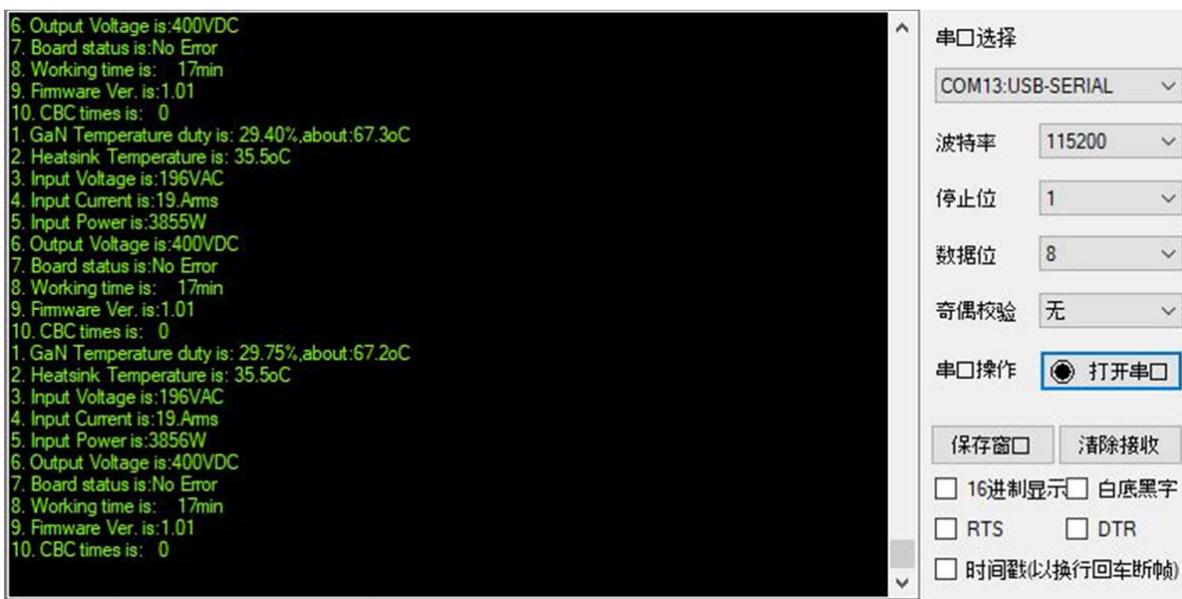


図 3-19. ハートビート・レポートでの GaN 温度上昇

3.6.8 パワーオフ・シーケンス

200VAC、4kW でのパワーオフ波形を 図 3-20 に示します。

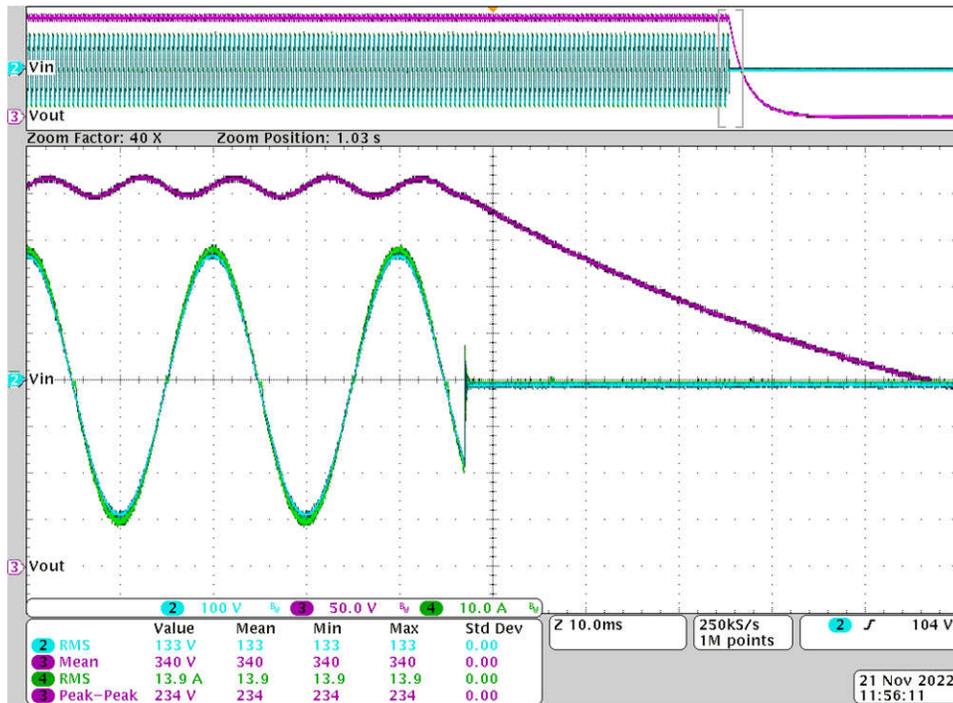


図 3-20. パワーオフ波形

3.6.9 サージ・テスト

ラインとニュートラル間の雷サージ試験を評価しました。この設計では 4kV のサージ試験に耐えることができます。サージによってワンショット・トリガ割り込みが発生します。ファームウェアが OST 割り込み時に PFC を停止した場合、PFC が停止し自動的に再起動しないため、サージ・テストはグレード C となります。OST 割り込み時にファームウェアが PFC を停止しない場合、PFC は動作を継続し、サージ・テスト結果はグレード A です。図 3-21 に 4kV ラインからニュートラル・サージ電圧への波形を示します。

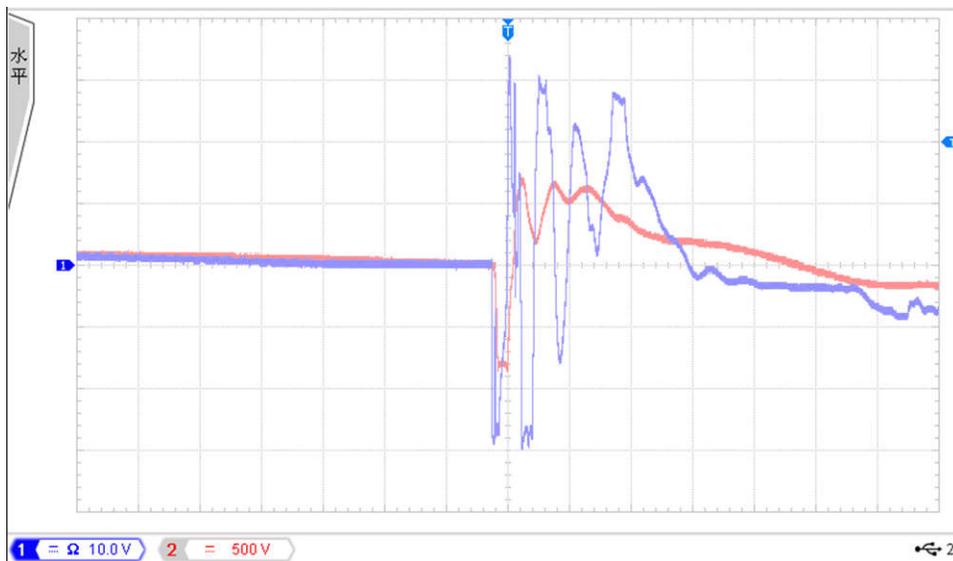
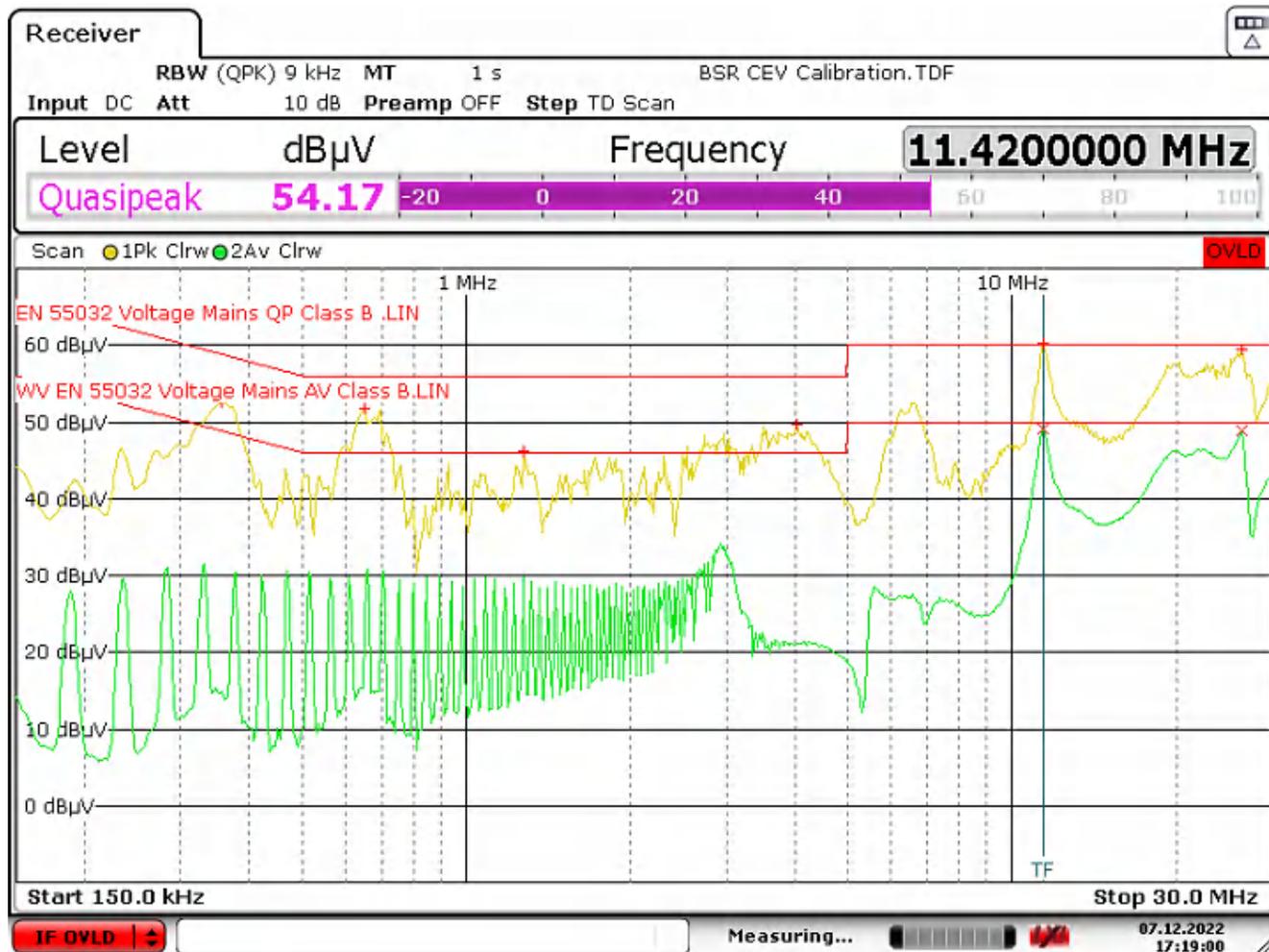


図 3-21. 4kV でのサージ・テスト

3.6.10 伝導エミッション・テスト

図 3-22 に、1.6kW 負荷での伝導エミッション・テスト結果を示します。(長い負荷ケーブルと大きな抵抗負荷を克服するために) DC 出力に CM チョークを追加し、ブースト・インダクタ用のシールド層を使用してボードをテストしました。結果から、このボードが EN55032 の Class B の制限に合格できることを示しています。11.42MHz でのノイズ・レベルは 59.17 (54.17dB μ V + キャリブレーションの 5dB μ V) であり、通常 6dB が必要なためマージンは多少小さくなります。ただし、ハウジング (エアコンの室外機は通常、金属製のハウジングを採用しています) と短い負荷ケーブルを使用すると、ライン・インピーダンス安定化ネットワーク (LISN) へのノイズがさらに減少し、マージンが非常に大きくなります。



Date: 7.DEC.2022 17:18:59

図 3-22. 伝導エミッション・テスト、(EN55032 Class B)

4 設計とドキュメントのサポート

4.1 設計ファイル

4.1.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDA-010236](#) 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) のダウンロードについては、[TIDA-010236](#) のデザイン・ファイルを参照してください。

4.2 ドキュメントのサポート

1. テキサス・インスツルメンツ、『[LMG352xR030-Q1](#) ドライバ、保護機能、温度レポート機能内蔵、650V、30mΩ GaN FET』データシート
2. テキサス・インスツルメンツ、『[TMS320F28002x](#) リアルタイム・マイクロコントローラ』データシート
3. テキサス・インスツルメンツ、『[AMC3302](#) DC/DC コンバータ内蔵、高精度、±50mV 入力、強化絶縁型アンプ』データシート
4. テキサス・インスツルメンツ、『[UCC2871x 1](#) 次側レギュレーション付き、定電圧、定電流コントローラ』データシート
5. テキサス・インスツルメンツ、『[UCC2871x 1](#) 次側レギュレーション付き、定電圧、定電流コントローラ』データシート
6. テキサス・インスツルメンツ、『[ISO772x](#) 高速、堅牢な EMC 強化型、ペーシック・デュアル・チャンネル・デジタル・アイソレータ』データシート

4.3 サポート・リソース

[TI 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。

4.4 商標

TI E2E™ and C2000™ are trademarks of Texas Instruments.

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

HELY ZHANG はテキサス・インスツルメンツのシステム・アプリケーション・エンジニアで、家電製品に関連する電力供給とモーター・インバータの開発を担当しています。Hely は 2002 年に安徽理工大学からパワー・エレクトロニクスの修士号を取得し、テキサス・インスツルメンツに入社する前は **SolarEdge** と **General Electric** で働いていました。

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 © 2022, 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](https://www.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 © 2023, Texas Instruments Incorporated