

Design Guide: TIDA-011008

3.6kW、GaN ベースの単相ストリング インバータリファレンス デザイン



説明

このリファレンス デザインは、GaN ベースの単相ストリング インバータの実装の概要を示します。この設計は、1 つのストリング入力で構成されており、最大 10 枚の太陽光発電 (PV) パネルを直列接続できます。230V 単相系統接続へのストリング入力からの公称定格電力は、最大 3.6kW です。3 つの電力段のデジタル制御は、単一の C2000™ MCU で実行されます。また、このボードは Wi-Fi® 通信ポートも搭載しており、モニタとリモート制御によるアクセスを容易に実現できます。

リソース

TIDA-011008

デザイン フォルダ

LMG3660R025

プロダクト フォルダ

TMCS1123

プロダクト フォルダ

CC3551E

プロダクト フォルダ

INA185

プロダクト フォルダ

ISOTMP35

プロダクト フォルダ

TMS320F28P551SG

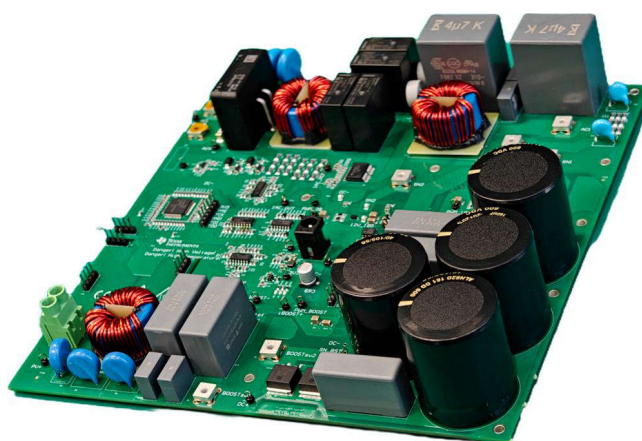
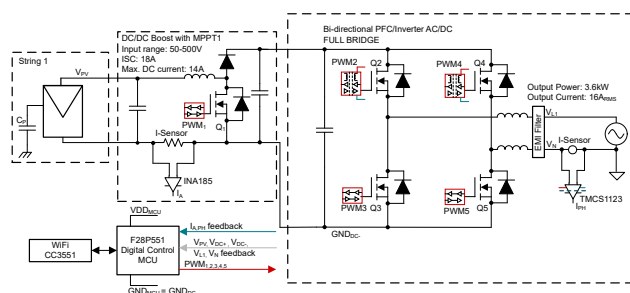
プロダクト フォルダ

特長

- 大電力密度の電力段により、ソーラー インバータの軽量化と設置の簡素化を実現
- 100kHz の高スイッチング周波数と高効率設計
- V_{DC-} を基準とするマイコンの GND によりコストが最適化され、 V_{DC-} に接続されたすべての GaN デバイスで非絶縁型駆動が使用可能
- コスト最適化フルブリッジトポロジ: H ブリッジ バイポーラ変調方式を実装し、制御の複雑さを低減するとともに、信頼性の高いグリッド注入を維持
- 非常に優れた電力品質: 高負荷条件下で、グリッドエミュレータにより 1.23% 未満の電流 THD を実現
- ワイヤレス コネクティビティ: 統合型 Wi-Fi 6 および BLE 通信に対応した SimpleLink™ デュアルバンド ワイヤレス マイコン (CC3551E) を搭載

アプリケーション

- ストリング インバータ
- 電力変換システム (PCS)



1 システムの説明

住宅用ソーラー電力の需要が増加し続ける中、単相ストリング インバータは、クリーン エネルギーのグリッド供給を促進するための重要なブリッジとして機能しています。従来のシリコンまたは IGBT 設計では、スイッチング速度が制限されており、サイズが大きすぎる磁気フィルタや重い熱管理が必要なため、効率と密度のボトルネックが生じていました。このリファレンス デザインは、窒化ガリウム (GaN) パワー トランジスタを使用することにより、市場におけるこれらの課題に対応しています。100kHz の高い周波数でシステムを動作させることにより、フィルタリング素子のフットプリントを節減でき、システム全体の部品表 (BOM) コスト削減につながります。

システム ハードウェア レイアウトは、1 つが 205mm × 205mm のローカル ボードにパーティショニングされており、次の両方の変換段に対応しています。

DC/DC 段: 最大電力点追従 (MPPT) 機能を実装した昇圧コンバータによるシングル チャネル PV 入力

DC/AC 段: バイポーラ変調方式を実行する 3.6kW フルブリッジ インバータ

制御、サンプリング、通信のすべてを、強力でコスト効率の優れたマイコン TMS320F28P551 で実行します。

1.1 主なシステム仕様

表 1-1. 仕様

パラメータ	仕様
PV の入力電圧範囲	50V ~ 500V (ストリングあたりパネル最大 10 枚)
最大 PV 短絡電流	18A
最大 公称 DC リンク電圧	520V 400V
定格 AC 出力電圧 電流	230V _{RMS} 16A _{RMS}
定格 AC 出力電力	3.6kW
スイッチング周波数	100kHz
周波数	50Hz ~ 60Hz
周囲温度	-40°C ~ +60°C
リファレンスデザインの寸法	205mm × 205mm × 85mm (ヒートシンクなし 45mm)



注意

電源を入れたままその場を離れないでください。



警告

高電圧！ 基板上は高電圧状態になっており、接触するおそれがあります。感電する可能性があります。基板は、不適切に取り扱った場合に感電、火災、負傷の原因となる電圧および電流で動作します。負傷や物品の破損を避けるために、必要な注意と適切な対策をもって機器を使用してください。安全のため、過電圧および過電流保護機能付きの絶縁された試験装置の使用を強く推奨します。

テキサス・インスツルメンツは、基板への電源投入やシミュレーション実行の前に、電圧要件および絶縁要件を確認し理解することがユーザーの責任であると考えます。電源投入中は、回路およびその接続部品には触れないでください。



警告

表面は高温！ 触れるとやけどの原因になることがあります。触らないでください！

基板の電源を入れたら、一部の部品は 55°C を超える高温に達することがあります。動作中は常に、また動作直後も高温の状態が続く可能性があるため、基板に触れてはいけません。



警告

テキサス・インスツルメンツは、このリファレンス デザインをラボ環境のみで使用するものとし、一般消費者向けの完成品とはみなしていません。このデザインは室温で動作することを意図しており、他の周囲温度での動作はテストされていません。

テキサス・インスツルメンツは、このリファレンス デザインを高電圧電気 機械部品、システム、およびサブシステムの取り扱いに伴うリスクを熟知した有資格のエンジニアおよび技術者のみが使用するものとしています。

基板上は高電圧状態になっており、接触するおそれがあります。 基板は、不適切に取り扱ったり適用したりした場合に感電、火災、負傷の原因となる電圧および電流で動作します。負傷や物品の破損を避けるために、必要な注意と適切な対策をもって機器を使用してください。

2 システム概要

2.1 ブロック図

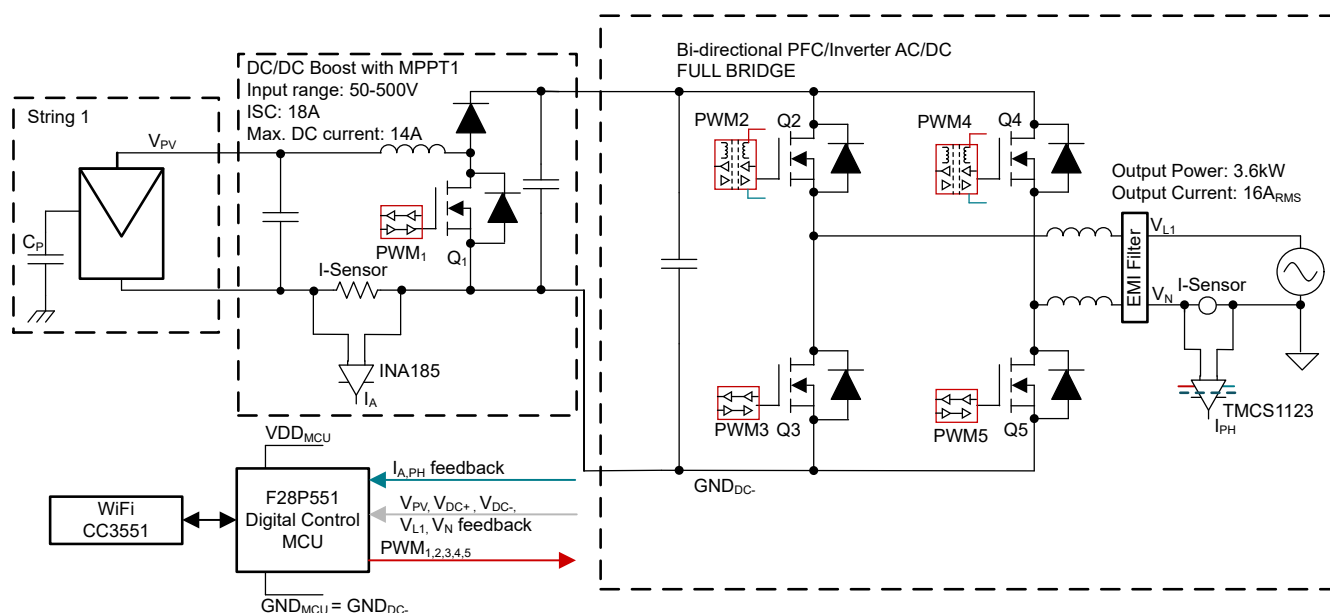


図 2-1. リファレンス デザインのブロック図

このボードには、HV から 12V に変換できる補助電源は付属していません。この基板を動作させるには、外部バイアス電源が必要です。

このトポロジは、AC グリッドと PV パネルの間で絶縁が確保されていないようなトランスレスのストリング インバータ アプリケーションに適しています。同相モード電流は、PV アプリケーションにおいて周知の課題であり、これは PV 表面が接地された屋根や近接する他の表面上に露出することによって起因しています。図 2-2 に示すように、表面積が大きいと、PV パネルと接地の間の浮遊容量が大きくなり、湿気の多い環境や雨の日には 200nF/kWp にも達することがあります。コンバータの同相モード電圧をうまく抑制できない場合、この寄生容量によってシステムに大きな同相モード電流が流れ込み、EMI や、グリッド電流の歪みなどの問題につながる可能性があります。

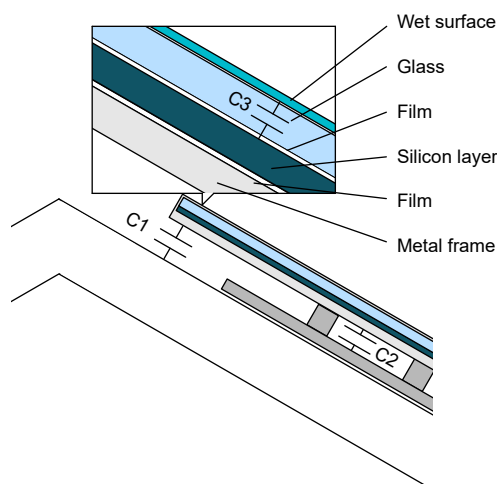


図 2-2. PV パネルの寄生容量

トランスを含むマイクロインバータは電流に対して高インピーダンスのリターン パスを確保しますが、ストリング インバータのようなコスト重視のアプリケーションでは、そうではありません。ストリング インバータは通常、リターン電流に対して低インピーダンスのパスを確保するため、図 2-3 に示すように非常に高い電流値になります。したがって、トランスレスの概念で

は、グラウンドへのリーク電流が重要な問題になります。このような目的で、発振を抑えた特殊な単相トランスレストポロジを実装することができます。これについては後述します。また、フレームレス パネルの導入により、このような問題はさらに少なくなりました。

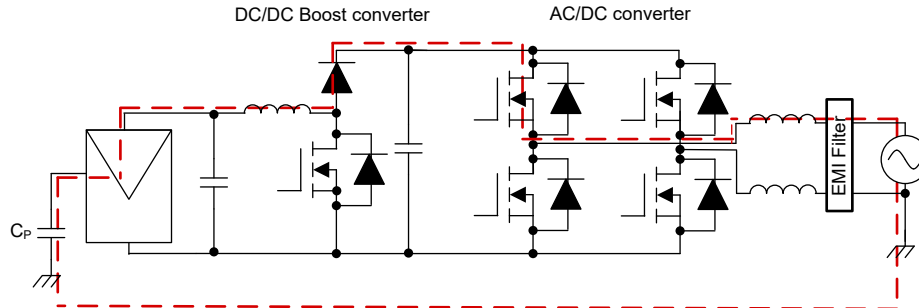


図 2-3. 同相モード ノイズ

この DC/AC コンバータ段は高いスイッチング周波数で動作し、正弦波グリッド電流を制御するため、EMI フィルタの設計をコンパクト化できます。単相の $230V_{RMS}$ グリッドにより、 $16A_{RMS}$ の出力電流で $3.6kW$ の出力電力が得られます。EMI フィルタは、同相モード除去能力を向上させるために両方のレールに分かれている 1 つの昇圧インダクタ、2 つの同相モードチョーク、 C_x コンデンサ、 C_y コンデンサで構成されています。EMI フィルタは、グリッドに注入される差動モードノイズと同相モードノイズの両方を減衰するように設計されています。さらに、このような単相アプリケーションに存在する $100Hz$ 電力リップルを補償するために、DC リンクには電解コンデンサが設けられています。貫通電流を防止するため、両方のハーフブリッジにデッドタイムを設定する必要があることに注意します。グリッドの電流は、比例共振 (PR) コントローラを使って、マイコンによって測定および制御されます。有効および無効電力を制御するには、共通結合点 (PCC) に流れる電流を高精度で測定する必要があります。電流制御を行うには、グリッド電圧周波数に同期したフェーズロックループ (PLL) を実装する必要があります。DC リンク電圧制御ループを使用して、グリッドから供給される有効電流シンクまたはソースの振幅を制御します。

2.2 DC/DC 昇圧コンバータ

PV ソーラー スtring からの可変低電圧入力 ($50V \sim 500V$) は、安定化されレギュレーションされた中間 $400V$ DC リンクバスに昇圧する必要があります。このステップは、C2000™ マイコンで駆動する非同期整流昇圧段を使用して制御します。

2.2.1 ブースト インダクタ設計

パワー コンバータの設計では、インダクタの設計が最も重要です。インダクタの設計に関する 4 つの重要な特性は、インダクタンス値、リップル電流、飽和電流、DC 抵抗 (DCR) です。

インダクタの値が小さいほど、設計サイズは小さくなります。インダクタの電流定格は、常にリップル電流を含めて計算される最大電流よりも高い必要があることに注意してください。

ソーラー アプリケーションで使用される昇圧インダクタの場合、次の式をスタータとして使用できます。

$$L \geq \frac{V_{IN} \cdot (V_{OUT} - V_{IN})}{\Delta I_L \cdot V_{OUT} \cdot f_{sw}} \quad (1)$$

ここで:

- V_{IN} は
- ΔI_L はリップル電流で、通常は公称入力電流の $0.2 \sim 0.4$ 倍です
- V_{out} は出力電圧です
- f_{sw} はスイッチング周波数

2.2.2 整流ダイオードの選択

SiC ショットキー ダイオードを使用すると、システム損失を低減し、効率を向上できます。ダイオードの導通損失は、次のように計算できます。ここで、 I_F は平均順方向電流です。

$$P_{DC} = I_F \cdot V_F \quad (2)$$

スイッチング損失は次のように計算できます。

$$P_{SW} = 0.5 \cdot I_{PK} \cdot V_R \cdot t_{rr} \cdot f_{sw} = Q_{rr} \cdot V_R \cdot f_{sw} \quad (3)$$

ここで:

- I_{PK} はピーク逆電流
- V_R は、定常状態での逆電圧
- t_{rr} は逆方向復帰時間
- f_{sw} はスイッチング周波数
- Q_{rr} は回復電荷

整流ダイオードの総損失は次のように計算できます。

$$P_D = P_{DC} + P_{SW} \quad (4)$$

2.2.3 ブースト冷却コンセプト

放熱特性と電力密度を最適化するために、専用のハイブリッド冷却コンセプトを使用します。

- GaN FET は上面冷却型アーキテクチャを採用しています。GaN FET は、1mm の薄型熱インターフェイス材料 (TIM) を通してアルミニウムヒートシンクに直接結合し、ケースからヒートシンクへの熱抵抗を最小限に抑えます。
- SiC (シリコン カーバイド) パワー ダイオードは、底面冷却構成を採用しています。共有ヒートシンクと接続する前に、PCB レイヤの銅サーマル ビアを経由して 3mm TIM ブロックまで熱を伝達します。

2.2.4 MPPT 動作

PV パネルからの出力電力は、パネルが受ける照射、パネル電圧、パネル温度など、いくつかのパラメータに依存します。相応して、PV パネルのストリングから出力される電力は、PV パネルの個々の条件によって異なります。出力電力は条件の影響を受けるため、1 日を通して連続的な変化もあります。図 2-4 に、1 枚のソーラー パネルの I-V 曲線と P-V 曲線を示します。I-V 曲線は、パネルの出力電流と出力電圧の関係を表します。図の I-V 曲線が示すように、パネル電流は端子が短絡しているときに最大になり、端子が開放状態で無負荷のときは最小になります。

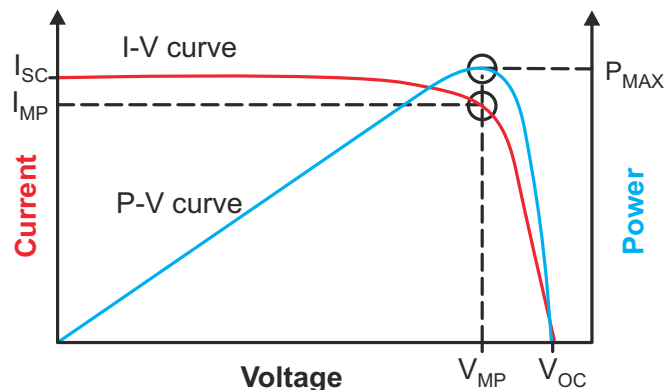


図 2-4. ソーラー パネルの特性、I-V 曲線と P-V 曲線

図に示すように、パネル電圧とパネル電流の積が最大になる点で、 P_{MAX} で表される最大電力がパネルから得られました。このポイントを、最大電力点 (MPP) と呼びます。図 2-5 および図 2-6 に、さまざまなパラメータによりソーラー パネルの出力電力が変化の様子の例を示します。また、これらのグラフは、放射照度に対する、ソーラー パネルの電力出力の変動も示しています。これらのグラフから、放射照度の増減に伴い、ソーラー パネルからの電力出力がどのように増減するかが分かります。また、MPP となるパネル電圧も放射照度の変化に伴って変化することにも注意してください。同様の概念は、ストリング出力電流に加えてストリング全体の電圧が監視されるストリング インバータにも適用できます。

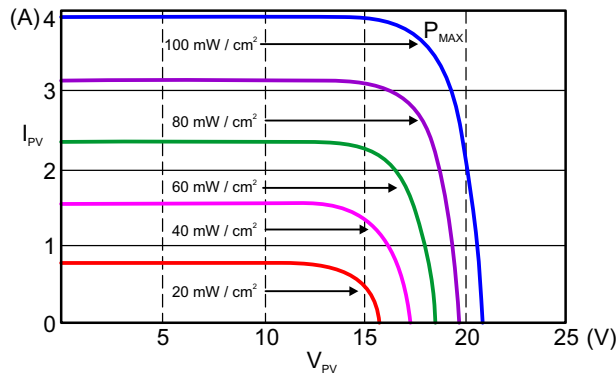


図 2-5. さまざまな照射条件でのソーラー パネル出力電力
変動 - グラフ A

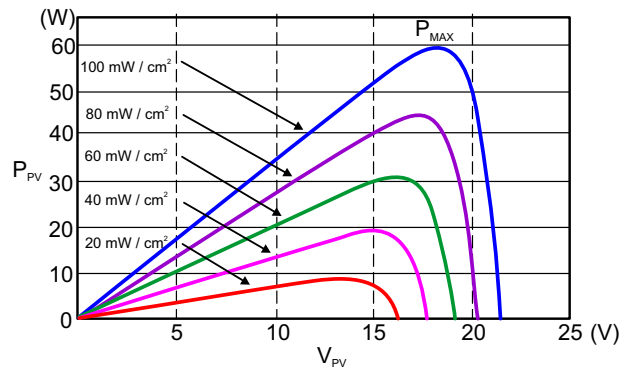


図 2-6. さまざまな照射条件でのソーラー パネル出力電力
変動 - グラフ B

パネルの MPP を自動的に識別するという課題は、通常、システムに MPPT アルゴリズムを採用して実現します。MPPT アルゴリズムは、ストリングが最大電力点で動作するように試み、スイッチング電力段を使用してパネルから取り出した電力を負荷に供給します。「山登り」(PO) は、最も一般的に使用されている MPPT アルゴリズムの 1 つです。このアルゴリズムのベースとなっている基本原理はシンプルで、マイコン ベースのシステムに簡単に実装可能です。このプロセスには、パネルの動作電圧のわずかな増減 (摂動) が含まれます。コンバータのデューティ サイクルを変更することで、ストリング電圧に摂動を加えることができます。ストリング電圧のわずかな上昇によりパネル電力が増加した場合、同じ方向に再度、摂動を行います。ストリング電圧の上昇に伴ってパネル電力が低下する場合、負方向の摂動によりストリング電圧をわずかに減少させます。摂動を実行して出力電力を観測することにより、システムはストリングの MPP 付近で、わずかに振動しながら動作するようになります。システムがどの程度 MPP の近くで動作できるかは、摂動の大きさにより決まります。このアルゴリズムは全体の最大値ではなく極大値に収束してしまう場合もありますが、これはアルゴリズムにわずかな微調整を加えることで解決することができます。PO アルゴリズムは実装が簡単で効果的であり、この設計のために選択されました。

2.3 DC/AC コンバータ

フルブリッジ インバータは、400V の DC リンク電圧を 230VRMS の正弦波ライン出力に変換します。この設計は、H ブリッジ バイポーラ変調方式を選択しています。バイポーラ スwitching では、ユニポーラ代替品と比較してスイッチング ノード全体で高い電圧スイングが発生しますが、高周波の同相電圧は除去されます。この機能により、トランス絶縁を必要とせずに、ソーラー フレームの寄生容量を通過してグラウンドに流れるリーク電流を排除できます。

2.3.1 インバータ インダクタ設計

インダクタは、システムの効率、電流リップル、全体のサイズにおいて重要な役割を果たします。インダクタンス値は、次のように計算できます。

$$L \geq \frac{V_{DCBus}}{2 * \Delta I_{Lpk-pk} - pk * f_{sw}} \quad (5)$$

ここで:

- V_{DCBus} は DC リンク電圧
- ΔI_{Lpk-pk} はピーク ツー ピーク リップル電流
- f_{sw} はスイッチング周波数

通常、ピーク ツー ピーク リップル電流は、最大出力電流の平均インダクタ電流の 40% 未満です。リップル電流が小さいほど、インダクタと EMI の問題でのコア損失は減少しますが、インダクタンスを大きくする必要があります。リップル電流が大きいほど、インダクタンスを減少させ、インダクタのサイズと重量を小さくできます。ピーク電流がインダクタの飽和電流を超えないようにしてください。

通常、グリッド接続の非絶縁型インバータ設計では、インダクタは 2 つの部分に分割されます。1 つは活線に、1 つはニュートラル ラインに取り付けられます。それぞれが、計算された L 値の半分です。このように、コモン モード ノイズを最大範囲まで抑制できます。

図 2-7 に、100kHz のスイッチング段で最大 500kHz のコモン モード ノイズ スペクトル シミュレーションを示します。このグラフから、各ラインに分割インダクタを使用した場合、コモン モード ノイズを 30dB μ V 超低減できることがわかります。

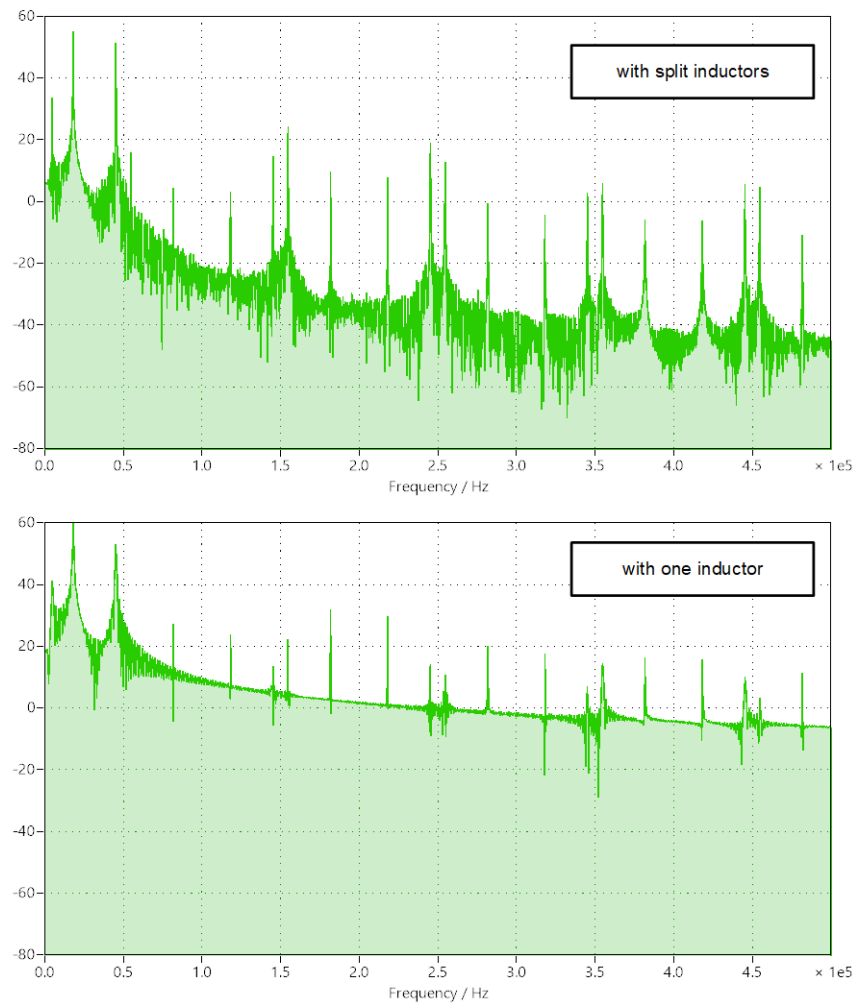


図 2-7. LISN のコモン モード ノイズ スペクトル

2.3.2 DC リンクコンデンサ

DC リンク コンデンサは、ライン周波数の電圧リップルの 2 倍を最小化するために使用されます。このため、システム内のパワー トランジスタで電圧リップルによる電圧ストレスは生じません。必要な DC リンク容量は、以下のように計算できます。

$$C_{OUT} \geq \frac{P_{OUT}}{V_{DCBus} * 2\pi * \Delta V_{ripple} * f_{AC}} \quad (6)$$

ここで:

- P_{OUT} は出力電力です。
- V_{DCBus} は DC リンク電圧
- ΔV_{ripple} はピーク ツー ピークの電圧リップル
- f_{AC} はライン周波数

2.3.3 C_x 容量の選択

C_x は電力線と中間線との間に接続されるコンデンサです。これらのコンデンサの目的は、DC/AC からグリッドに注入される差動モード ノイズを減衰させることです。これらのコンデンサの値は、グリッドに供給される無効電力と差動モード減衰との間のトレードオフです。デフォルトでは、グリッドに注入される無効電力は次の値に等しくなります。

$$Q = V_{LN}^2 * C_x * \omega \quad (7)$$

ここで:

- C_x は、電力線と中間線との間に接続された等価容量を表します
- ω はグリッドの電氣的な脈動です

非常に大きな容量を配置すると注入ノイズが大幅に減少しますが、無効電力が過度に大きくなります。

2.3.4 C_y 容量の選択

小さなリーク電流 (標準値で 5 ~ 30mA) を検出して、デバイスの損傷や感電を防止します。リーク電流の問題については、リーク電流値 100mA が最長 0.04 秒続く場合、トランスレス インバータを搭載した PV システムの使用を停止しなければならないとする規格があります。

Y コンデンサを流れるリーク電流は、次のように計算できます。

$$I_Y = V_{LN}^2 * C_Y * \omega \quad (8)$$

2.4 主な使用製品

2.4.1 LMG366xR025 - ドライバと保護機能を内蔵した 650V、25mΩ GaN FET

ドライバと保護機能を内蔵した LMG366xR025 GaN FET は、スイッチ モード パワー コンバータを対象としています。このデバイスを使うと、設計者は比類ない電力密度と効率を実現できます。

調整可能なゲートドライブ強度により、独立な有効化と最大限無効化スルーレートの制御が可能で、EMI のアクティブ制御とスイッチング性能の最適化に使用できます。ターンオンのスルーレートは 10V/ns から 80V/ns まで変化しますが、ターンオフのスルーレート制御が利用できるのは LMG3666R025 と LMG3667R025 のみです。ターン オフのスルーレートは、負荷電流の大きさに応じて 10V/ns から最大値に制限できます。

保護機能として、低電圧ロックアウト (UVLO)、サイクル単位の電流制限、短絡保護、および過熱保護が搭載されています。LMG3661R025 は、外部デジタル アイソレータに電源を供給するための 5V LDO 出力を LDO5V ピンに備えています。

LMG3666R025 は、ゼロ電圧検出 (ZVD) 機能を備えており、ゼロ電圧スイッチングが発生したとき ZVD ピンからパルスを出します。LMG3667R025 は、ドレイン-ソース間電流が負であり、ゼロクロスポイント検出時に Low に遷移すると ZCD ピンを High に設定するゼロ電流検出 (ZCD) 機能を備えています。

2.4.2 TMS320F28P551 リアルタイム マイクロコントローラ

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 インストルメンツの 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 160MHz 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 ブレー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。

F28P55x は、最大 576KB のフラッシュ メモリをサポートしています。これらは 2 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 101KB 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。

2.4.2.1 ハードウェアの特長

TMDSCNCD28P55X ハードウェアの特長は次のとおりです。

- ・ オンボードの 6 ピン JTAG デバッグ コネクタにより、リアルタイムのシステム内でのプログラミングとデバッグが可能になり、安全のために絶縁型デバッグが必要です。
- ・ インターフェイス上にあるアナログ I/O、デジタル I/O、JTAG 信号

2.4.2.2 ソフトウェアの特長

TMDSCNCD28P55X ソフトウェアの機能は次のとおりです。

- ・ TI Code Composer Studio IDE - TI のマイコンと組み込みプロセッサ向けの統合開発環境 (IDE)
- ・ ソフトウェア開発キット (SDK)
- ・ C2000Ware - 下位レベルのデバイスドライバとサンプル。
- ・ DigitalPower SDK - さまざまな AC-DC、DC-DC、DC-AC 電源アプリケーション向けのデジタル電源システム開発

2.4.3 TMCS1123 - 強化絶縁を備えた高精度 250kHz ホール エフェクト電流センサ

TMCS1123 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、磁気コンセントレータは不要です。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 $\pm 96\text{A}$ 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、信頼でき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。

2.4.4 INA185 26V、350kHz、双方向、高精度、電流センス アンプ、超小型 (SOT-563) パッケージ

INA185 電流センス アンプは、コスト重視でスペースの制約が厳しいアプリケーションで使用するよう設計されています。このデバイスは、電源電圧にかかわらず -0.2V~+26V の同相電圧で電流センス抵抗の両端の電圧降下を検出する双方向電流センス アンプ (電流シャント モニタとも呼ぶ) です。INA185 は、整合抵抗ゲイン回路を、4 つの固定ゲイン デバイス オプション (20V/V、50V/V、100V/V、または 200V/V) に統合しています。この整合ゲイン抵抗回路により、ゲイン誤差が最小限に抑えられ、温度ドリフトが低減されます。

INA185 は、単一の 2.7V~5.5V 電源で動作します。このデバイスの最大消費電流は 260 μA で、スルー レートと帯域幅が高いため、多くの電源およびモータ制御アプリケーションに最適です。

INA185 は、業界標準の SC70 パッケージと薄型の 6 ピン SOT-563 パッケージで供給されます。SOT-563 パッケージの本体サイズは、デバイス ピンを含めてもわずか 2.56mm² です。すべてのデバイス オプションは、拡張動作温度範囲の -40°C~+125°C で動作が規定されています。

3 ハードウェア、ソフトウェアのテスト要件、およびテスト結果

3.1 ハードウェア要件

この設計の Device Under Test (DUT) は、以下に示す複数のコンポーネントで設定され、動作します。

- TIDA-011008 基板、ヒートシンクおよびサーマル インターフェイス材料 (T-Work8000)。
- XDS110ISO-EVM などの 4 ピンまたは 6 ピンの絶縁型 JTAG デバッグ
- 12V 出力と 2A 定格の電源アダプタ
- ノートブック PC
- オシロスコープ、電流、電圧プローブ。
- 温度カメラ
- 調整可能な大電力 AC 抵抗 (4kW 定格)
- 3.6kVA 双方向 AC グリッド エミュレータ (230VAC)
- 3.6kW ソーラー パネル エミュレータ (600VDC)
- 3.6kW DC 負荷 (400V)

3.2 テスト設定

3.2.1 TIDA-011008 のテスト

このテスト条件では、システムは閉ループ制御モードで動作するように構成されています。制御は TMS320F28P551 によって実行されます。マイコンは電流制御ループを実装しており、AC ソース エミュレータからのグリッド電圧と同期できます。グリッドとの同期は PLL によって行われます。同時に、電圧制御ループによって、3 つの電流ループのピーク電流リファレンスが生成されます。ピーク電流は、DC と AC の間を流れる有効電力を制御します。

DC 側では、ソーラー パネル エミュレータが DC 入力から DC リンクに流れる電力を制御します。

この動作条件で、電力に対する効率が測定されました。

3.3 テスト結果

3.3.1 TIDA-011008 の昇圧段のテスト

このテストを実行するには、3.2.1 に示すようにボードを接続する必要があります。

このテストでは、コモン モード チョークを短絡した状態で昇圧段をテストし、DC 負荷接続時に DC リンク コンデンサの 1 つを取り外しました (図 3-1 を参照)。テスト結果を以下に示します。

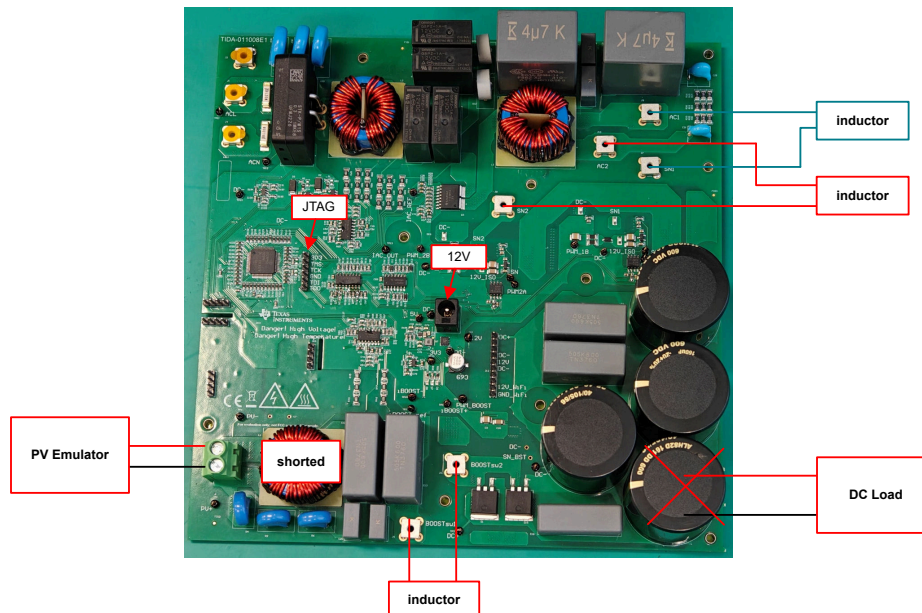


図 3-1. 昇圧段のテスト用接続

図 3-2 に示すスイッチング ノードの波形には、 40V/ns を超える V_{ds} スループレートでも大きなオーバーシュートやリンギングは発生しないため、GaN 電力段にクリーンな電源ループと良好な統合型ドライブ回路があることを示します。

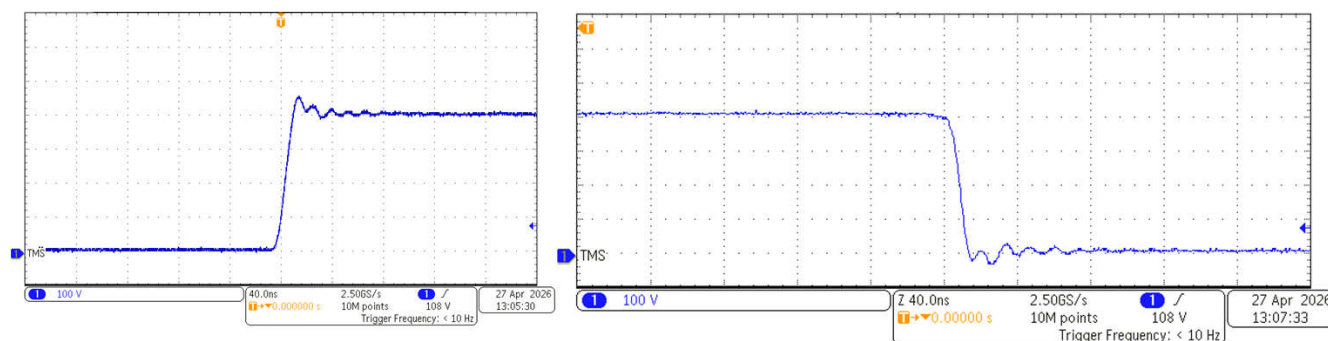


図 3-2. 昇圧スイッチング ノード波形

図 3-3 に示すように、高い負荷の最大効率はやく 99.2%、全負荷効率は約 99.1% です。

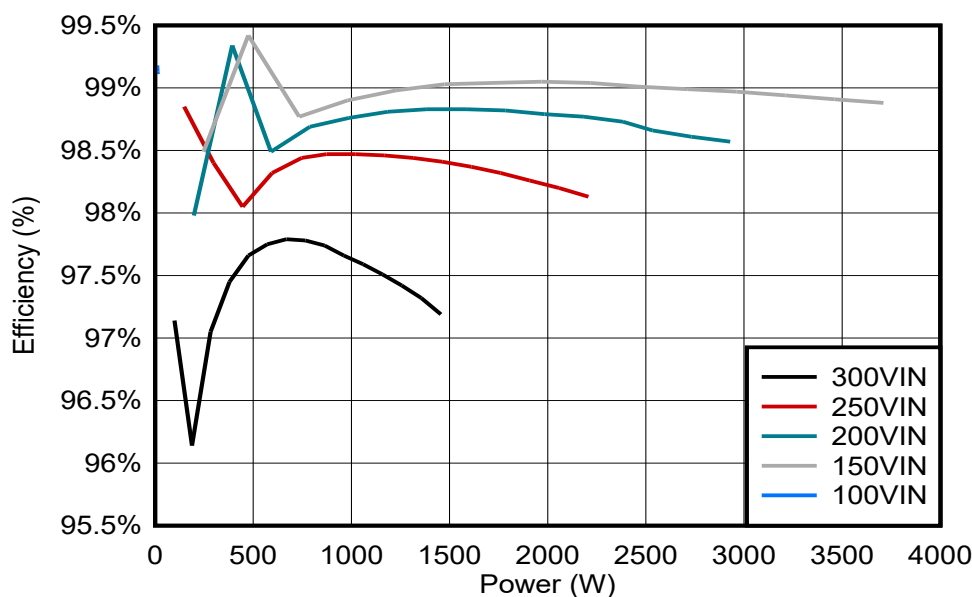


図 3-3. さまざまな入力電圧に対応する昇圧段効率

低負荷状態では、昇圧インダクタの電流が 0 になり、昇圧が DCM モードになるいくつかの高効率ポイントがあります。この条件では、GaN デバイスのターンオン電圧が非常に低いため、ほぼ ZVS を実現でき、効率が大幅に向上します。

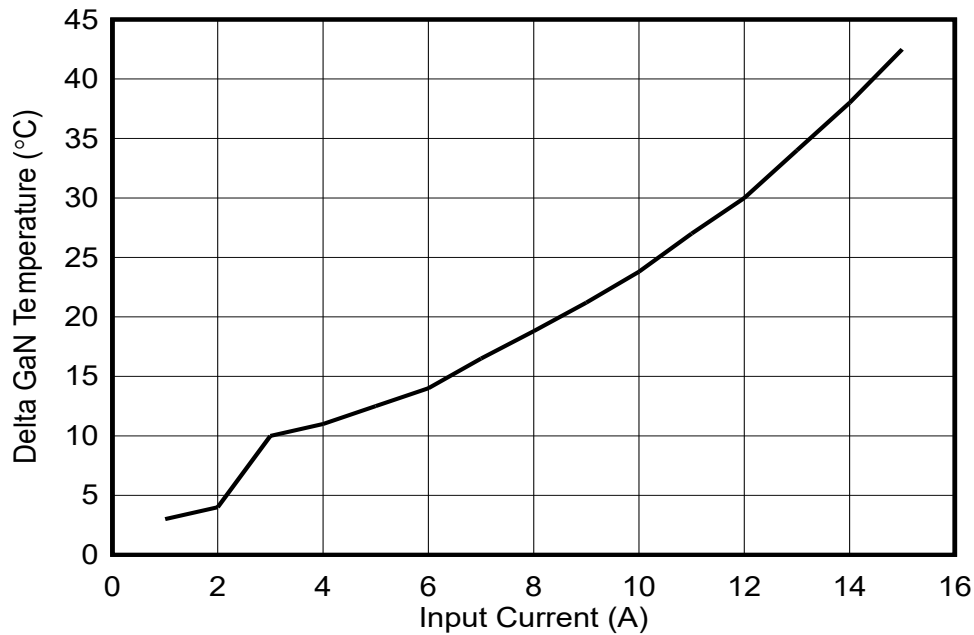


図 3-4. 昇圧段 GaN の温度上昇

図 3-4 に示すように、最大出力電力時の GaN の温度上昇は約 43°C です。GaN の上面がヒートシンクで取り付けられているため、温度は PCB の反対側で測定されます。テスト条件は、入力電圧 250VDC、出力電圧 400VDC です。

3.3.2 TIDA-011008 DC/AC 段のテスト

このテストを実行するには、図 3-5 に示すようにボードを接続する必要があります。DC 入力は 400V、AC 出力は 230Vrms の AC 電圧に接続されています。

このテストでは、コモン モード チョークを短絡した状態で DC/AC 段をテストし、DC 電源の接続に関して DC リンク コンデンサの 1 つを取り外しました。テスト結果を以下に示します。

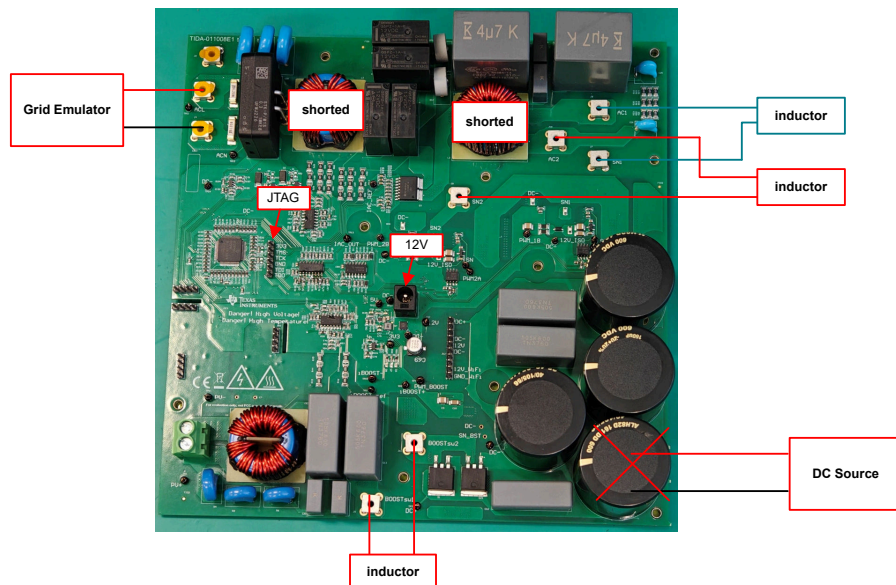


図 3-5. DC/AC 段のテスト用接続

図 3-6 に示すスイッチング ノードの波形には、40V/ns を超える V_{ds} スルーレートでも大きなオーバーシュートやリンギングは発生しないため、GaN 電力段にクリーンな電源ループと良好な統合型ドライブ回路があることを示します。

チャンネル 1 の波形は 1 つのレッグ スイッチング ノード、チャンネル 2 の波形は別のレッグ スイッチング ノードの波形です。
チャンネル 4 の波形は AC 出力電流です。

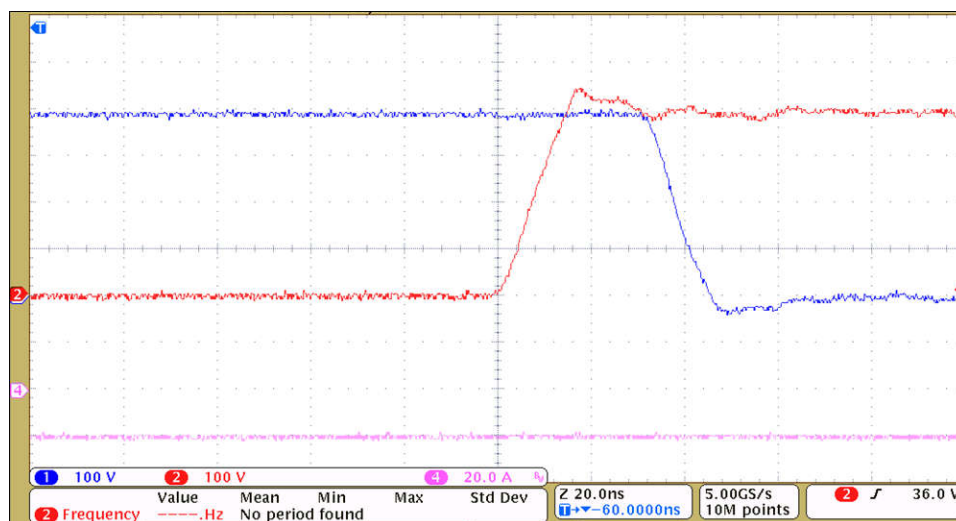


図 3-6. DC/AC スイッチング ノード波形

図 3-7 に示すように、DC/AC 段のピーク効率は約 98.4% です。全負荷効率は約 98% です。

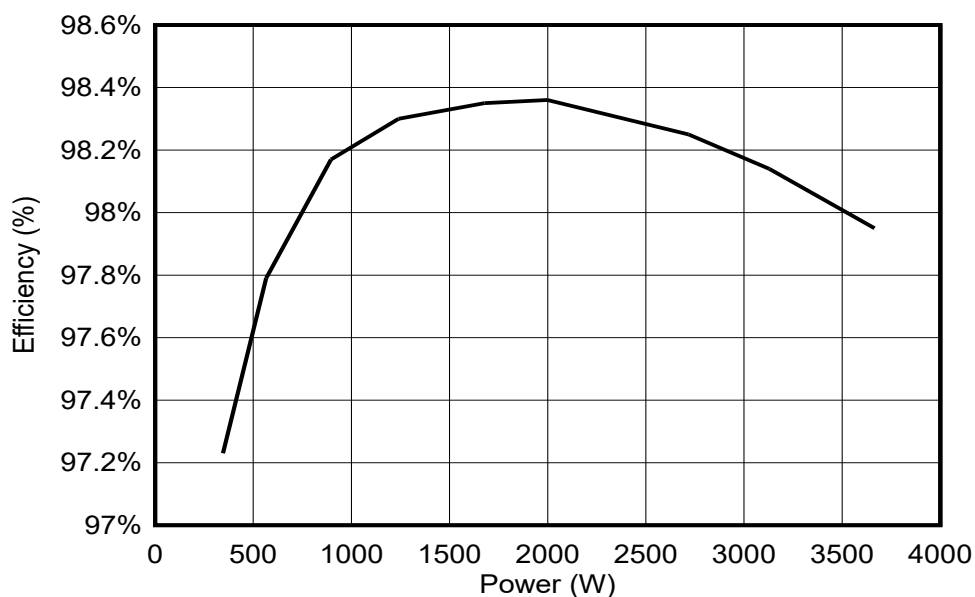


図 3-7. 400VDC 入力時の DC/AC 段の効率

このテストでは、テスト前にヒートシンクを 40°C まで加熱します。周囲温度は約 30°C です。図 3-8 に示すように、最大出力電力時の GaN の温度は約 80°C で、GaN の温度上昇は約 50°C です。GaN の上面がヒートシンクで取り付けられているため、温度は PCB の反対側で測定されます。

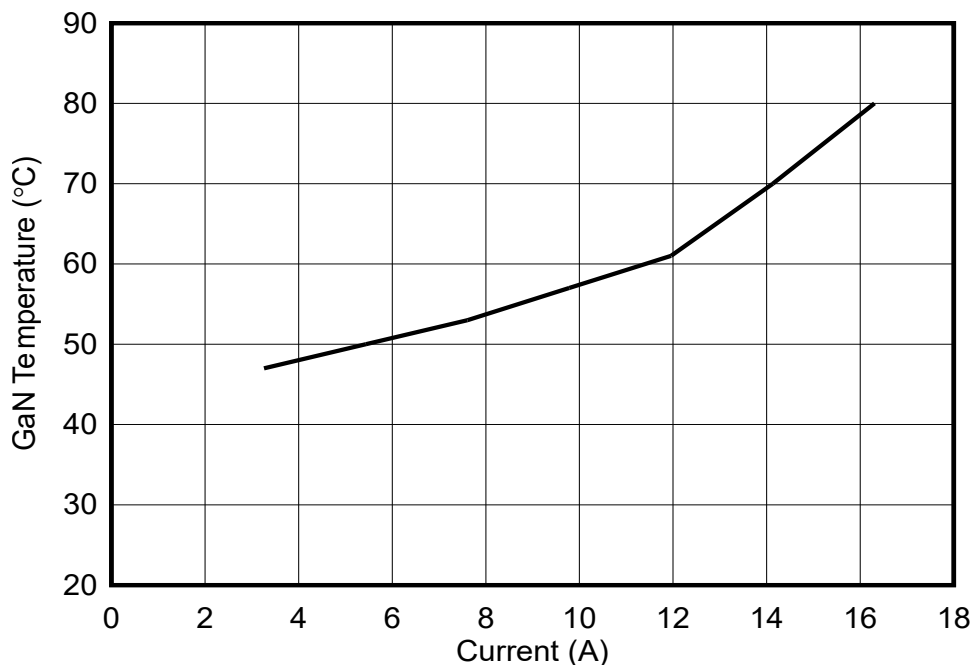


図 3-8. DC/AC 段の GaN 温度

3.3.3 システム全体のテスト

この章では、2 つの段を組み合わせてテストし、システムの効率を検証します。

このテストを実行するには、図 3-9 に示すようにボードを接続する必要があります。3 個のコモン モード チョークが基板に実装済みです。以下にテスト結果を示します。

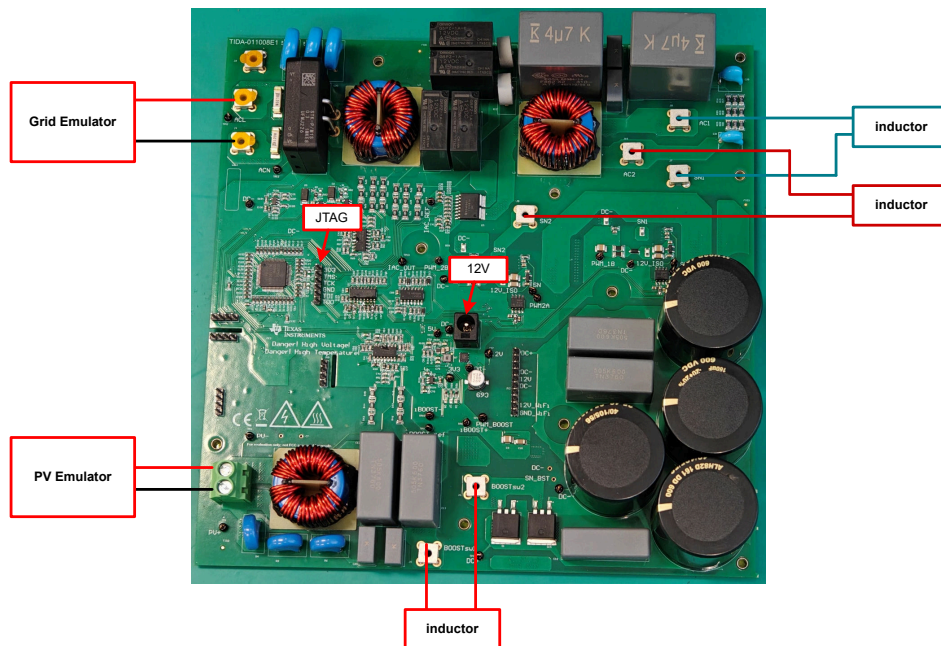


図 3-9. ボード全体をテストするための接続

図 3-10 に示すように、出力 AC 電流は非常に小さい THD (1.23%) です。CH1 は昇圧インダクタ電流、CH2 は DC リンク電圧、CH3 はグリッド電圧、CH4 はグリッド電流です。

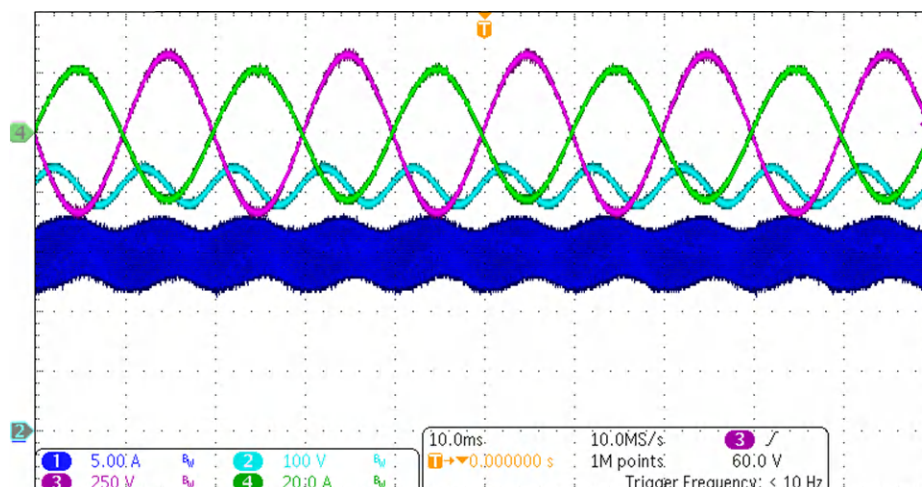


図 3-10. ボード全体のテスト波形をグリッド エミュレータに接続

図 3-11 からわかるように、実際のグリッドに接続しても (AC 電圧 4.2% THD)、出力電流 THD はかなり低い (3.5%) と言えます。

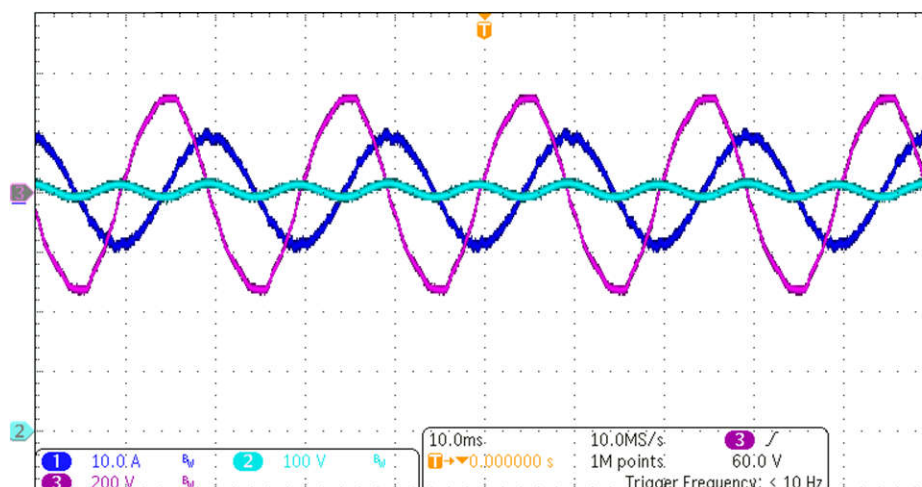


図 3-11. ボード全体のテスト波形を実際のグリッドに接続

全負荷時のシステム全体の効率は、100kHz において昇圧および DC/AC 段スイッチングを行った場合 96.7% であり、CEC 重み付け効率は 96.4% です (図 3-12 を参照)。DC 入力は 250V、AC 出力は 230Vrms の AC 電圧に接続されています。

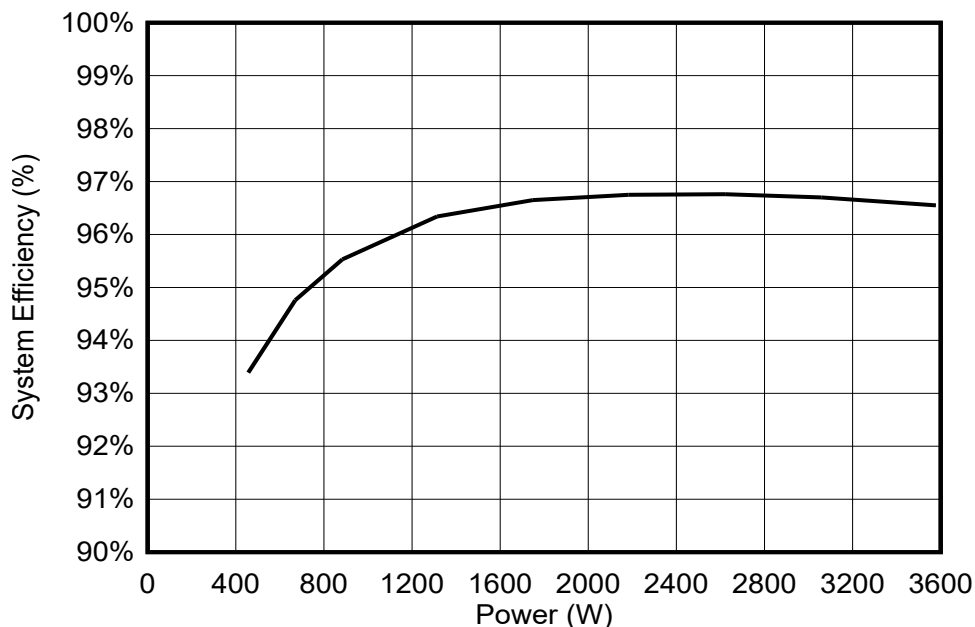


図 3-12. 両方の段のスイッチングによるボード全体のテスト効率

全負荷時のシステム全体の効率、昇圧段でスイッチングを行わず 100kHz での DC/AC 段のスイッチングを行う場合は 97.4%、CEC 重み付け効率は 97.3% です (図 3-13 を参照)。DC 入力は 400V、AC 出力は 230Vrms の AC 電圧に接続されています。

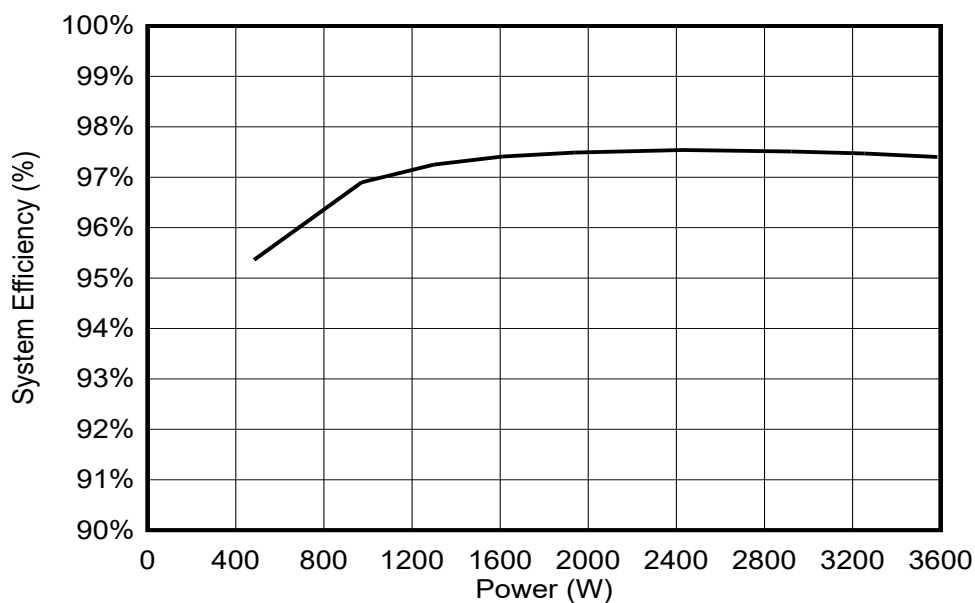


図 3-13. 昇圧段がスイッチングしない場合のボード全体のテスト効率

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

デザイン ファイルをダウンロードするには、TIDA-011008 のデザイン ファイルを参照してください。

4.1.1 回路図

回路図をダウンロードするには、TIDA-011008 の設計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-011008 の設計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

TMDSCNCD28P55X リアルタイム マイコン。

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、『昇圧コンバータの電力段の基礎的計算』アプリケーション ノート。

4.4 サポート リソース

テキサス インスツルメンツの 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られる場所です。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。

商標

C2000™ and SimpleLink™ are trademarks of Texas Instruments.

Wi-Fi® is a registered trademark of Wi-Fi-Alliance.

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

BOWEN LING は、テキサス・インスツルメンツのシステム エンジニアで、エネルギー インフラストラクチャ チームのソーラー エネルギー分野に所属しています。同氏は、中国南京の南京航空航天大学でパワー エレクトロニクス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、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](https://www.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