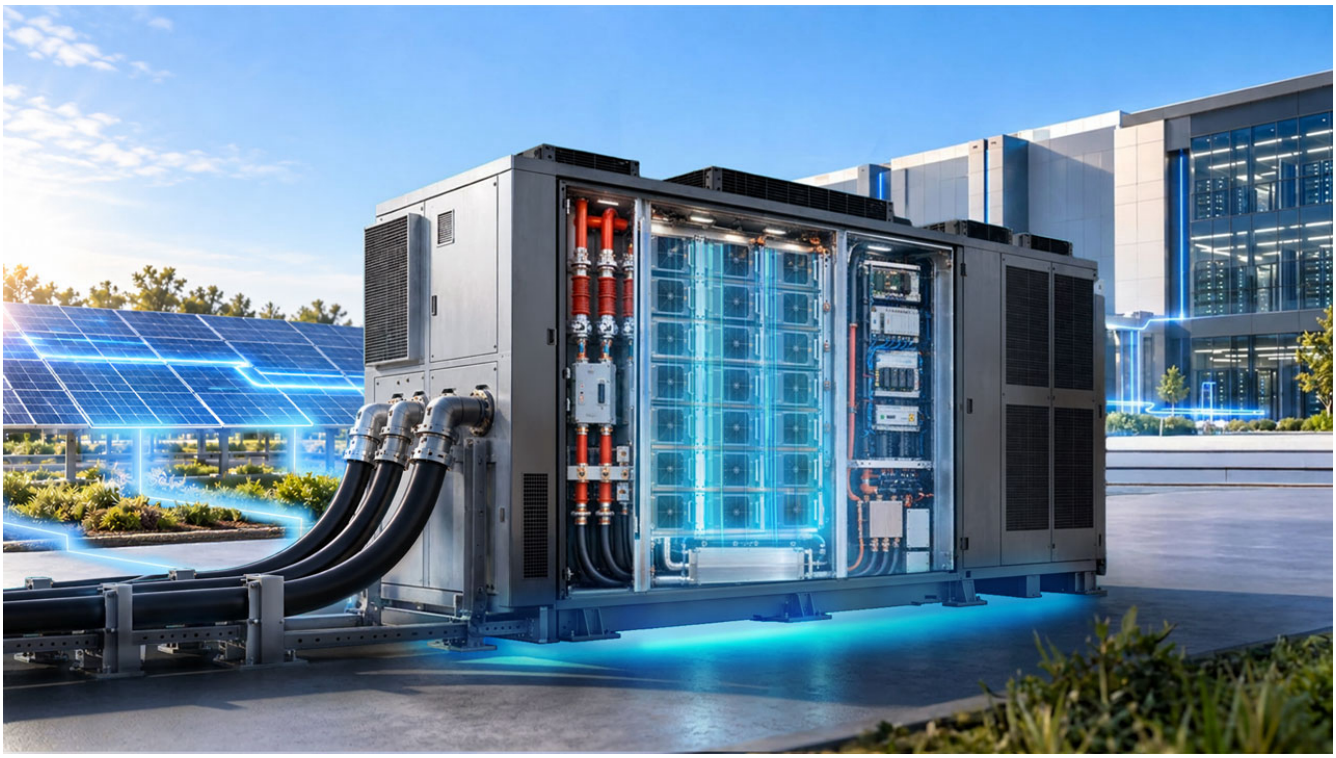
参考資料

Technical Article

半導体トランスは、グリッド スケールの電力供給をすぐに活用できます

Harald Parzhuber、*グリッド インフラと電力供給部門のシステム マネージャ*

- 半導体トランス (SST) は、35kV と 6MW にスケール化できる、効率的でコンパクトな電力供給を実現します。
- SiC (シリコン カーバイド) 技術の進歩により、データ センタ、電気自動車 (EV) 充電、エネルギー ストレージの各アプリケーションで SST の採用が加速しています。



SST は長年にわたって、電力変換効率の向上、システム サイズの縮小、フレキシブルな電源アーキテクチャの実現といった潜在能力を提供してきました。最近まで、技術面と経済面の制約が原因で、この種の普及が制限されてきましたが、電圧定格 3.3kV に達する高度な SiC パワー デバイスは、この種の障壁を克服できています。これらのデバイスは、高いスイッチング周波数、より高い DC リンク電圧、より少ないコンバータ セルを実現し、よりコンパクトなアーキテクチャをサポートします。SST の開発では、2MW ～ 6MW の電力レベル、最大 35kV のグリッド電圧を目標としており、エンジニアは高度なコンバータ トポロジ、高電圧絶縁、リアルタイム制御、信頼性の高い通信に優先順位を付ける必要があります。

これらの能力が急速に普及しており、データ センタ、メガワットクラスの EV 充電、グリッド接続型エネルギー ストレージでの SST の採用が進んでいます。データ センタでは、SST ベースの電源アーキテクチャにより、グリッドからグラフィックス処理ユニットへの全体的な電力供給効率を 1 パーセント以上向上できます。単一の人工知能 (AI) コンピュートラックが約 1MW を消費することを考えると、この限界的な利益は、大規模なデータ センタ施設全体で意味のあるエネルギー節約につながります。

図 1 に、低周波トランスや多段の AC/DC および DC/DC 変換を使用する従来のアプローチから、中電圧グリッドから高周波変圧器を経由して $800V_{DC}$ または $1.5kV_{DC}$ に直接変換するまでのアーキテクチャの変化を示します。

English Document: SSZTDE9
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

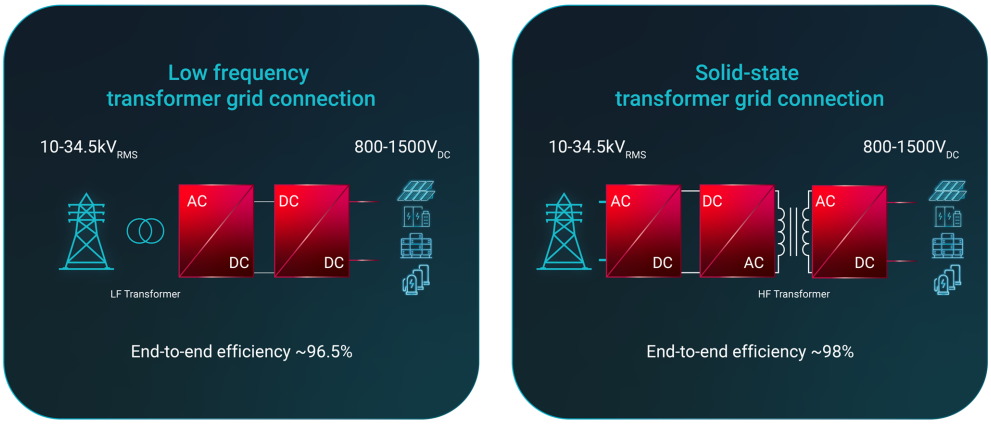


図 1. 低周波数のトランスをベースとするグリッド接続と SST 実装の場合の効率の削減

SST を低周波トランスの代替選択肢として活用できるようになった変更

最新の各種 SiC デバイスは、スイッチング周波数の引き上げと同時に、電力損失の低減に対応しているため、システム全体の効率が向上します。このように動作周波数を高くすると、受動部品の小型化も可能になり、設計のコンパクト化と原材料コストの削減につながります。テキサス インスツルメンツ (TI) は、絶縁型ゲートドライバ、絶縁技術、センシング ソリューション、リアルタイム制御機能によりこれらのシステムをサポートし、大規模な SST 展開をますます実用性を向上させています。

典型的な SST 実装では、中電圧側 ($_{AC\ MV}$) でスタック型の AC/DC コンバータを使用し、低電圧側 (図 2) で並列接続した DC/DC 出力を使用します。

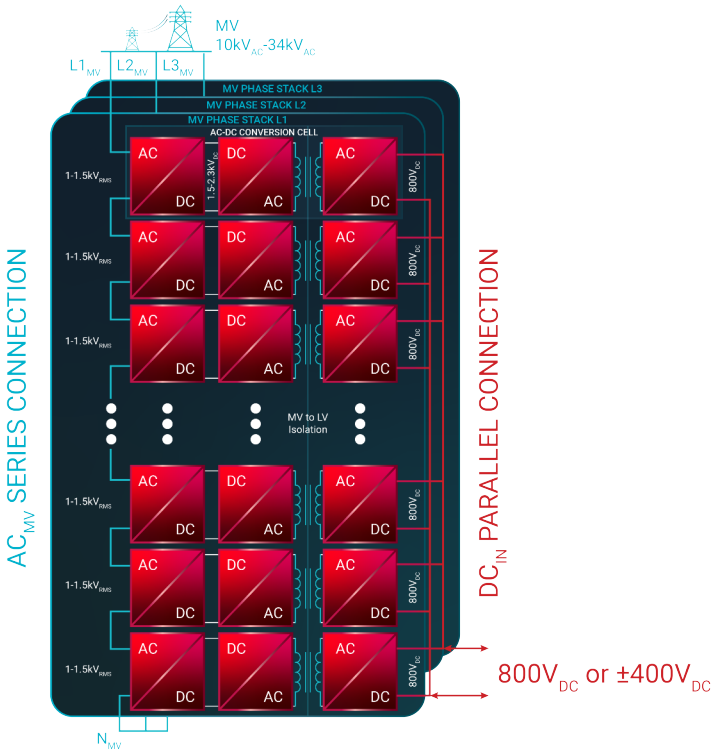


図 2. エアコンと機械式換気コンバータをスタックし、低電圧出力を並列接続した、一般的な SST 実装

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

パワー半導体のブレークダウン電圧は、設計者が SST アーキテクチャを実装する方法に直接影響を及ぼします。初期の実装は主に 1.7kV パワー デバイスに依存していましたが、定格 2.3kV および 3.3kV の SiC モジュールが利用できるかどうかは、システム設計に大きく変化しています。特に、これらのデバイスは DC リンク電圧を高くできるため、セルの総数を削減できます。たとえば、1.2kV デバイスで 100 個のコンバータセルを必要とする SST を、3.3kV SiC デバイスで約 50 個のセルに削減できます。この低減により、システム設計の簡素化、物理的サイズの小型化、通信アーキテクチャの複雑さの軽減が実現します。すべてのコンバータセルは中央コントローラと通信する必要があるためです。図 3 は、SiC 電圧定格が 1.2kV から 3.3kV に上昇したときに、さまざまな中電圧クラスにわたってセル数がどのように減少するかを示しています。

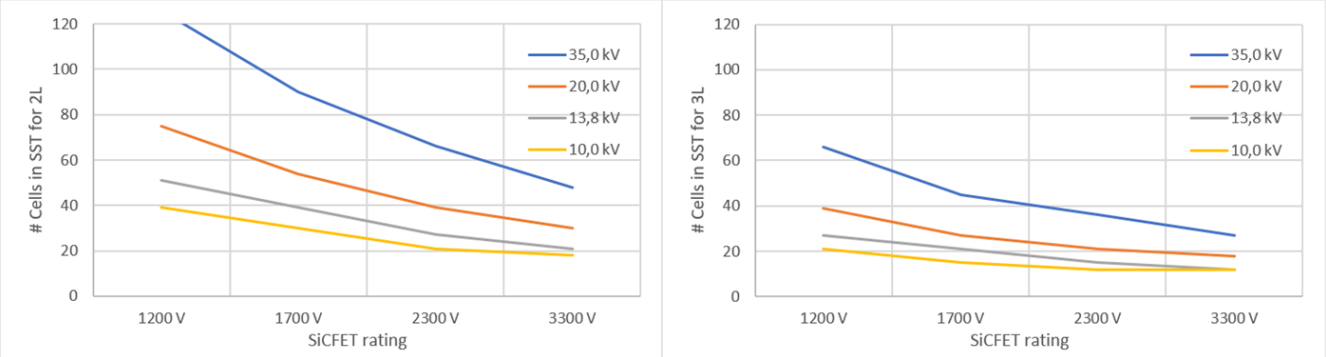


図 3. SiC 定格に基づいた 2L および 3L 変換セルのセル スケーリング

同時に、電力密度の向上、スイッチング速度の高速化が原因で、対応するエレクトロニクスに対する需要が大きくなります。ゲートドライバは、脱飽和検出、調整可能なスルー レート制御のサポート、パワー モジュールに十分なゲートドライブ電流の供給、最大 100V/ns という非常に高い同相過渡耐性条件の下で高い信頼性で動作することなど、高度な保護機能を実現する必要があります。さらに、個々のコンバータ セル内の動作電圧が 2kV を上回る場合、絶縁型ゲートドライバの実装は、信頼性の高い動作を維持するために、カスケード接続絶縁バリアなど、特定の設計手法も必要になります。

2.3kV から 3.3kV の範囲のデバイスは、アーキテクチャとコストの実際的なトレードオフを提供しますが、冗長性戦略も提供します。N+1 または N+2 フェーズ スタック構成では、追加された各冗長セルは、より電圧の高い SiC デバイスを使用する場合、設置電力容量がより大きくて高価に増加します。フェーズ スタック冗長性の概念では、一般に N+1 構成または N+2 構成を使用して、個々のセルに障害が発生した場合でもシステムの動作を継続できます。したがって、エンジニアはセル数の削減と各冗長ユニットのコストの増加のバランスを取る必要があります。

SST 向けの電圧要件と電力クラス

SST に関連する電力と電圧のクラスも増加しています。初期の実装は概して約 1MW に制限されていました。現在、グリッドに接続する中電圧のソーラ システムやエネルギー ストレージ システム (ESS) は通常、約 2MW ～ 4MW の電力から始まり、一部のシステムは 6MW に達しています。したがって、新しい SST の開発は 2MW ～ 6MW の範囲の電力レベルをサポートする必要があり、いくつかのメーカはすでにこれらの電力クラス内のシステムを発表しています。

グリッド電圧の要件は並列に進化しています。以前の SST 設計は、主に 10kV および約 13.8kV の中電圧グリッドを対象としていましたが、将来の世代で最大 35kV のグリッド電圧をサポートすることが予想されています。このような高い電力レベルと電圧レベルにより、電力密度、絶縁、高電圧絶縁に関する追加の要件が生じます。TI は、効率的なグリッド接続型高電圧電源システムをサポートするように設計されたゲート駆動、絶縁、センシング、制御用技術により、これらの要件に対応しています。

SST のアーキテクチャの選択肢

従来の SST 設計は主に 2 レベルの H ブリッジ コンバータに依存していましたが (図 4 を参照)、マルチレベル トポロジ、特にアクティブ中性点クランプ (ANPC) コンバータが次世代 SST の AC/DC 段で一般的になりつつあります。これらのトポロジは、最新のシステムのより高い電圧ストレスと効率の要件に対応します。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

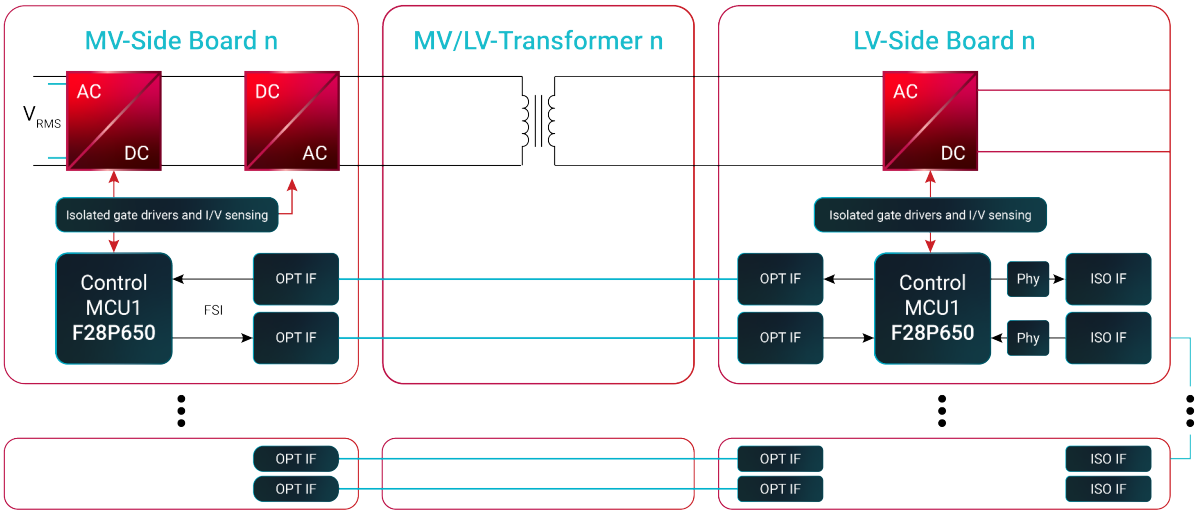


図 4. AC/DC と絶縁型 DC/DC を採用した変換セル アーキテクチャ

絶縁型 DC/DC 段については通常、設計者は位相シフト デュアル アクティブ ブリッジ (DAB) コンバータと共振 CLLLC DAB コンバータのどちらかを選択します。複数の DC/DC コンバータは SST 内で並列に接続されるため、位相シフト DAB などの固定周波数トポロジが、より簡単に同期できるようにする場合が多くあります。一方、CLLLC DAB アーキテクチャは、わずかに異なるスイッチング周波数につながる可能性があり、可聴ビート周波数や電気的干渉が発生する可能性がありますが、フィルタリングが困難です。

多様なアプリケーション要件に対応するため、TI は以下のデバイス技術を提供しています。

- リアルタイム マイコン (MCU) は、ANPC、中性点クランプ、T 型、フライング コンデンサの各コンバータなど、2 レベル H ブリッジとマルチレベル トポロジ向けの確立済みの変調技術をサポートします。
- 高電圧ゲートドライバと絶縁機能は、2.3kV と 3.3kV の SiC パワー モジュールの動作電圧要件を満たすことを特化した設計を採用しています。
- 絶縁型センシング ソリューションは、高電圧、高周波の環境向けに最適化された、電流と電圧の高精度センシングを実現します。

制御マイコンのグランドを、リアルタイムの TI C2000™ マイコンを使用するなどで、DC リンクの中点に接続することで、設計者は絶縁バリアの両端の電圧ストレスを低減し、関連する動作電圧を 2kV 未満に維持できます。

SST アーキテクチャが、高い電力レベル、グリッド電圧の向上、電力密度の向上、統合性の高い制御に対応するために進化し続ける中で、パワー半導体に関連する技術はますます重要になっています。高電圧ゲートドライバ、絶縁、センシング、リアルタイム制御、信頼性の高いシステム通信はいずれも、次世代の SST システムを実現するうえで重要な役割を果たします。

設計上の課題を克服する必要があります

アーキテクチャの選択に加えて、SST 設計において、設計者は各コンバータ セル内で AC/DC 段と絶縁型 DC/DC 段の同期という大きな技術的課題に直面します。これらの機能は、2 つの異なる電圧ドメイン間で動作します。AC/DC 段と絶縁型 DC/DC コンバータの 1 次側は中電圧側で動作し、絶縁型 DC/DC コンバータの 2 次側は低電圧側で動作します。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

これらのドメイン間の絶縁バリアは、SST の全位相 — 中性線間電圧に耐える必要があります。35kV のライン間で定格を持つシステムの場合、この電圧は約 20kV に達することがあります。この要件を満たすには、図 5 に示すように、高周波トランスが中央に配置されている構成において、十分な物理的な間隔に加え、適切な寸法が確保された絶縁距離および沿面距離が必要となります。中電圧プリント基板 (PCB) (図 5A) と低電圧 PCB (図 5B) では、絶縁クリアランスはコンバータモジュールの動作電圧に準拠する必要があります。この電圧は、新しい SST システムでは通常 2kV を超えません。

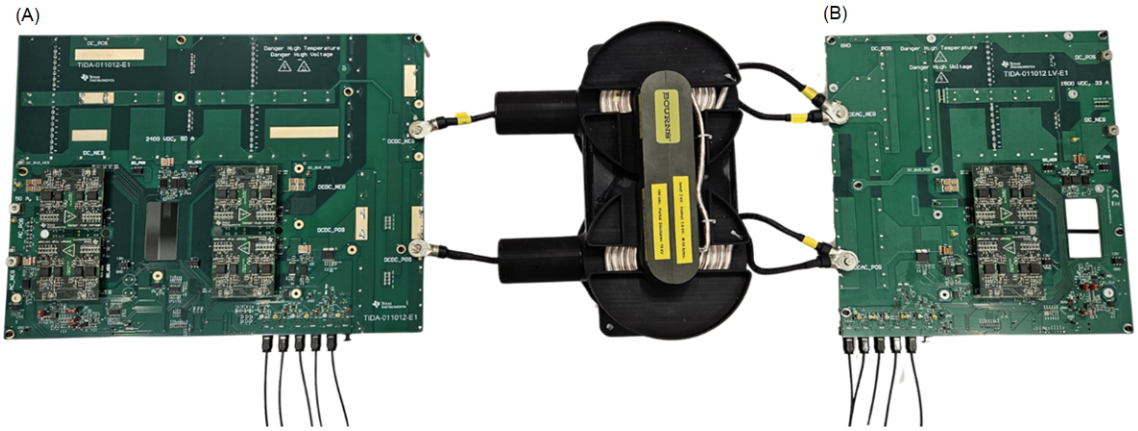


図 5. 50kW の SiC ベースのモジュール型 SST。中電圧 (A) と低電圧 (B) の各 PCB の間にプラスチック光ファイバ インターフェイスを搭載しています

設計者は、光リンクまたは無線周波数技術を使用して、この高電圧絶縁バリア経由の通信を実装できます。光ファイバ通信は、低レイテンシ、電磁干渉に対する強力な耐性、高い絶縁能力という特長があるので、現在好ましいアプローチです。このため、SST システム全体のコストを削減するうえで、よりコスト効率の高い高速光トランシーバが重要な役割を果たします。

さらに、設計者は各位相スタック内で、中央コントローラと個々のコンバータセル間の通信を開発する必要があります。広く採用されて信頼性の高いプロトコルをベースにする標準化済み通信アーキテクチャを使用すると、相互運用性を簡素化しながら、欧州連合のサイバーレジリエンス法などの規制の枠組みを含め、進化するサイバーセキュリティ要件に容易に対応できる

TI は、開発期間の短縮に役立つリソースとリファレンス デザインを提供しています。たとえば、中電圧アプリケーション用 50kW SiC ベースのモジュール型ソリッドステートトランスのリファレンスデザイン (前に 図 5 に示す) が、適切な出発点になります。

SST の採用によって恩恵を受けるその他のアプリケーション

SST の開発も、特にメガワットクラスの充電インフラストラクチャにおいて、EV 充電の分野で急速に進歩しています。現在では、オペレータはこれらのシステムを最大 690V_{AC} で動作する低電圧グリッドに接続し、従来の低周波数トランスを介して中電圧グリッドと接続しています。

SST を採用すると、中電圧グリッドとのより直接接続が可能になり、発電と EV バッテリの間の電力変換段の数を減らすことで、エネルギー効率を向上させることができます。このアーキテクチャは、ヘビーデューティ仕様の EV や、複数のディスペンサを搭載した充電場所に特に魅力的です。

中電圧のグリッド接続型 ESS は、もう 1 つの有力なアプリケーションです。太陽光発電と蓄電を複合設備では、集中型ソーラ インバータを DC 側で ESS に直接接続すると、セントラル インバータでソーラ電力を DC から AC に変換し、次いでストレージのために AC から DC に戻す必要がなくなります。これらの変換はエネルギーを浪費する 2 段階の変換です。SST を介して中電圧グリッドに接続された DC 結合ソーラ + ストレージ アーキテクチャにより、電力変換チェーン全体が簡素化され、変換損失が低減され、システム効率が向上します。

このようなアプリケーション全体で、SST を採用すると、エネルギー変換と電力供給の点でシンプルかつ効率的なアーキテクチャを実現できます。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

著者について

Harald Parzhuber は、テキサス インスツルメンツ の再生可能エネルギー システム チームを指揮しています。彼には 30 年以上にわたるエンジニアリング (工学や開発) の経験があり、設計とテストのエンジニアリングから、製品の定義やシステムに関するエンジニアリングまで、広い範囲に携わってきました。これに加えて、彼は産業オートメーション分野で 4 つの特許を取得しています。Parzhuber は、ドイツのランツフートにある応用科学大学で電気工学の修士号を取得しています。

その他の資料

- 50kW SST 設計のデモ ビデオ「AI データ センタに従来のトランスを置き換える」をご確認ください。

商標

C2000™ は テキサス インスツルメンツの商標です。

すべての商標はそれぞれの所有者に帰属します。

Copyright © 2026 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