

トータムポール型ブリッジレス PFC のための新しい CCM-TCM マルチモード制御方式

Bosheng Sun

Systems Engineer, Texas Instruments

概要

データセンターの電源ユニット (PSU) には、高効率と高電力密度が求められます。昨年発表された 80 Plus Ruby 認証は、データセンター向け PSU に対してこれまでで最も高い効率基準を定めています。表 1 に示すように、80 Plus Ruby の効率は、すべての負荷条件において 80 Plus Titanium を上回るだけでなく、これまで規定されていなかった 5% 負荷時でも 90% の効率を要求しています。

80 PLUS 認定	230V 内部冗長				
定格負荷のパーセンテージ	5%	10%	20%	50%	100%
80 Plus Titanium		90%	94%	96%	91%
80 Plus Ruby	90%	91%	95%	96.5%	92%

表 1. 80 Plus 認定レベル

一方で、サーバー ラックのスペースが限られていることや電力需要の増加により、高電力密度が求められるようになっていきます。最新のモジュール型ハードウェア システム – 共通冗長電源は、185mm x 39mm x 73.5 のフォーム ファクタで 3.6kW の電力をターゲットとしており、111W/in³ の電力密度を達成していますが、他の PSU 製品は引き続き 80W/in³ ~ 90W/in³ レベルです。

サーバー用 PSU は、トータムポール型ブリッジレス力率改善 (PFC) 回路と DC/DC コンバータで構成されています。トータムポール型ブリッジレス PFC で従来用いられている制御方式には、連続導通モード (CCM) または三角導通モード (TCM) がありますが、それぞれに制約があります。CCM トータムポール型ブリッジレス PFC は高電力密度を実現できますが、ハードスイッチングのため効率が制限されます。特に軽負荷時にはスイッチング損失が支配的となります。TCM ト

ータムポール型ブリッジレス PFC は、ゼロ電圧スイッチング (ZVS) により全負荷範囲で優れた効率を実現できますが、インダクタ電流リップルが大きいため、これを低減するには 2 相以上のインターリーブ動作が必要となります。その結果、電力密度の低下やコストの増加を招きます。表 2 に、この二つの方法を比較します。

	CCM 動作	TCM 動作
長所	<ul style="list-style-type: none"> インダクタ電流のピークツーピークリップルが小さい シンプルな制御 	<ul style="list-style-type: none"> ZVS
短所	<ul style="list-style-type: none"> ハードスイッチング、大きいスイッチング損失 	<ul style="list-style-type: none"> インダクタ電流のピークツーピークリップルが大きい 高出力用途では電流リップルを低減するためにマルチフェーズのインターリーブ動作が必要となり、その結果、電力密度の低下およびコストの増加を招きます 制御が複雑

表 2. トータムポール PFC での CCM と TCM の比較

高効率と高い電力密度を両方とも実現するには、図 1 に示すように、トータムポールブリッジレス PFC をマルチモードで動作させることができます。重負荷時、または AC 半周期のピーク付近では、必要とされる PFC の入力電流が大きくなり、PFC は CCM で動作します。負荷が低下した場合や、AC のゼロ付近で必要とされる PFC の入力電流が小さい領域では、PFC は TCM に切り替わり、ZVS で動作します。

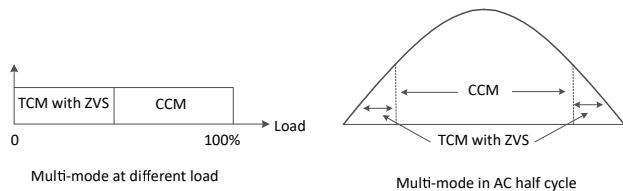


図1. CCM_TCM マルチモード動作

純粋な CCM と比較して、マルチモード制御は ZVS により軽負荷時の効率が優れています。また、純粋な TCM と比較すると、インダクタ電流リップルが大幅に低いためマルチフェーズのインターリーブ動作が不要であり、サイズおよびシステムコストの両方を大幅に削減できます。CCM と TCM の両方の利点を組み合わせることで、高効率と高電力密度の両方の要求を満たすことが可能になります。

軽負荷時に PFC が TCM に入る方法

TCM 動作では、スイッチング周期の終了時にインダクタ電流がゼロまで低下する必要があります。一方、CCM PFC では昇圧インダクタンスが大きいので、AC 半周期の全体にわたってインダクタ電流はほぼ常にゼロより大きい状態となります。インダクタ電流をゼロまで低下させるための一つの方法は、ブースト インダクタンスを、CCM PFC より小さく、TCM PFC より大きく設定することです。

インダクタンスを低くすると電流リップルが増加するため、マルチモード動作によって得られる効率向上が、電流リップル増加によるインダクタ コア損失の増加を上回るようにインダクタを設計することが重要です。また、インダクタ電流リップルが CCM よりも大きくなるため、電磁干渉フィルタも再設計する必要があります。

別のオプションは、図2に示すように、同じ CCM インダクタを維持しながら、スイッチング周波数フォールドバック プロファイルを使用することです。スイッチング周波数は AC のピーク時に最も高く (CCM 動作時の公称スイッチング周波数に等しい)、AC のゼロ交差に向かって徐々に低下します。

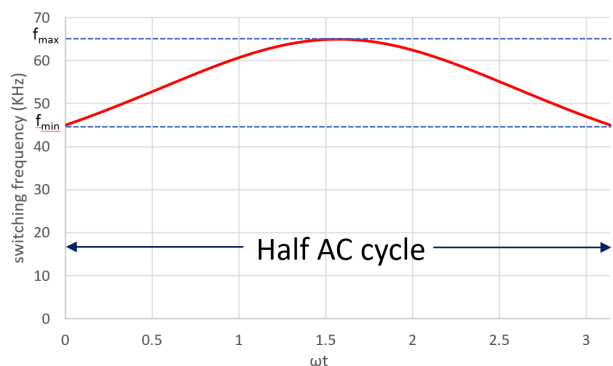


図2. AC 半サイクルのスイッチング周波数プロファイル

式1で、AC 半サイクル全体でのスイッチング周波数を計算します：

$$f = \frac{1}{\frac{1}{f_{\min}} - \left(\frac{1}{f_{\min}} - \frac{1}{f_{\max}} \right) \sin(\omega t)} \quad (1)$$

ここで、 f_{\max} は従来の CCM 動作で使用されるスイッチング周波数、 f_{\min} は最小スイッチング周波数、 ωt は AC 入力電圧の角度周波数です。

スイッチング周波数が低下することで、スイッチング周期の終了時にインダクタ電流がゼロまで低下し、TCM 制御が可能になります。これにより、PFC は AC のピーク付近では CCM で動作し、AC のゼロ交差付近では ZVS を伴う TCM に切り替えて動作させることができます。最小スイッチング周波数をさらに下げると、TCM 領域が拡大する可能性があります。ループ帯域幅が狭くなり、全高調波歪み (THD) が低下したり、ループが不安定になる可能性があります。

ゼロ電流を検出する方法

TCM 制御では、PFC のグランド帰路に抵抗を配置するか、ブースト インダクタに第 2 巻線を追加してゼロ電流検出 (ZCD) 回路を構成することで、インダクタ電流がゼロに低下する瞬間を検出できます。TI の LMG3427R030 ガリウム ナイトライド (GaN) 電界効果トランジスタ (FET) などの一部のデバイスには ZCD 回路が内蔵されており、電流がゼロになると ZCD 信号を生成します (図3に示すとおりです)。このデバイスを高周波スイッチとして使用すると、設計プロセスを大幅に簡素化できます。ZCD 信号は、マイコン (MCU) に送信され、さらに処理が行われます。

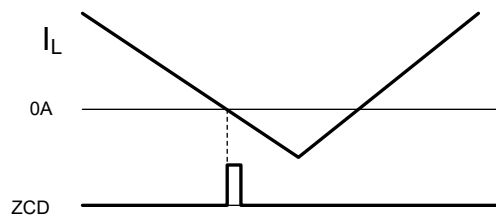


図3. ZCD 信号生成

TCM で ZVS を実現する方法

TCM で ZVS 動作を実現するには、スイッチ ノード電圧を放電するために、インダクタ電流が負方向に流れる必要があります。ZCD 信号を受信すると、マイコンはこの ZCD 信号に時間遅延を加え、その遅延された ZCD 信号を用いて PWM をオフし、PWM カウンタをリセットします (図 4 に示すとおりです)。リセット後、次のスイッチング周期が開始され、ブーストスイッチがオンになります。この時間遅延により、インダクタ電流がゼロに低下した後も同期スイッチがオンのままとなるため、インダクタ電流は負方向に流れます。遅延時間を適切に調整することで、負方向電流の量を調整でき、その結果、スイッチ ノード電圧をゼロまで放電させることができます。そしてそのタイミングでブーストスイッチをオンにすることで、ZVS を実現します。

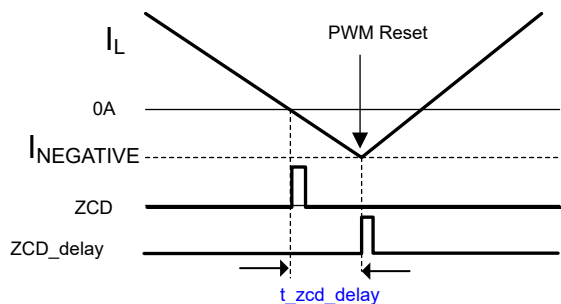


図4. PWM をリセットするために ZCD 遅延を追加

同期スイッチがオフになってから昇圧スイッチがオンになるまでに与えられたデッドタイム Δt に対して、式 2 はスイッチ ノード電圧を完全に放電するために必要な最小負電流を計算します:

$$I_{\text{NEGATIVE}} = -\frac{2 \times C_{\text{OSS}} \times V_{\text{out}}}{\Delta t} \quad (2)$$

ここで、 C_{OSS} はスイッチの出力容量、 V_{out} は PFC 出力電圧です。

式 3 で、必要な最小 ZCD 遅延時間を計算します:

$$t_{\text{zcd_delay}} = \frac{L \times |I_{\text{NEGATIVE}}|}{V_{\text{out}} - V_{\text{in}}} \quad (3)$$

ここで、 L は昇圧インダクタンス、 V_{in} は PFC 入力電圧です。

式 3 で、 V_{in} が V_{out} に近い場合、図 5 に示すように、計算された遅延時間が、遅延 ZCD 信号が次のスイッチング周期に入るほど長くなることがあります。ここで PWM をリセットするのは間違っています。これを防止するため、図 5 に示すように、ZCD 信号の開始から、現在のスイッチング周期の終了時に終了する ENABLE ウィンドウを生成します。マイコンはこの ENABLE ウィンドウと遅延された ZCD 信号の AND を取って RESET 信号を生成し、その RESET 信号を用いて PWM をリセットします。これにより、PWM リセットが同じスイッチング サイクル内でのみ発生できるようになります。

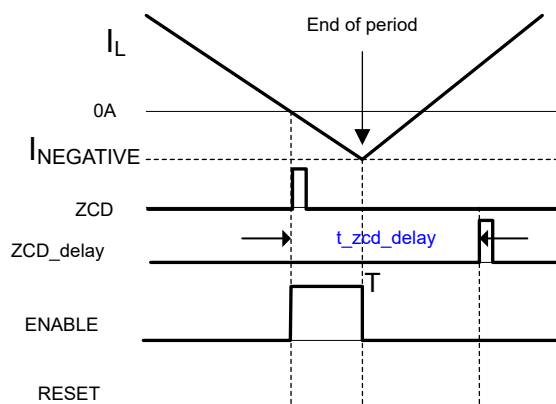


図5. ENABLE ウィンドウおよび RESET 信号

CCM と TCM の間の遷移

CCM と TCM の間の遷移は自動的に行われます。AC ピークまたは重い負荷では、インダクタ電流が大きくなります。電流はゼロまで低下せず、ZCD 信号も生成されないため、RESET 信号も生成されません。PWM カウンタは、公称スイッチング周期の終了時に自然にリセットされます。また、スイッチング周波数は公称スイッチング周波数と等しいので、図 6 に示すように、PFC は従来型の CCM PFC と同じように動作します。

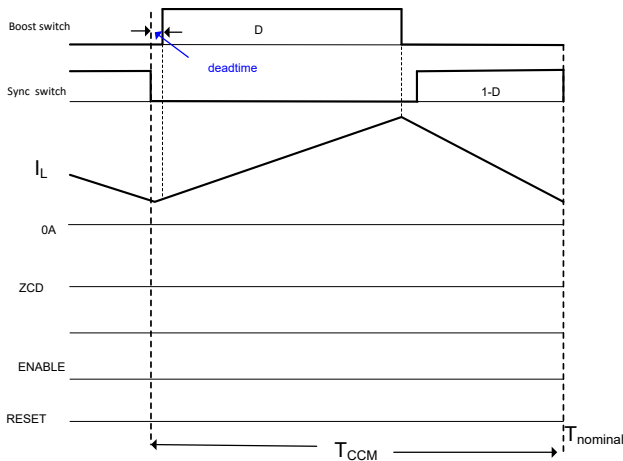


図6. AC ピーク時の CCM 動作

AC がゼロ交差に近づくにつれて、インダクタ電流およびスイッチング周波数の両方が低下し、インダクタ電流はスイッチング周期の終了前にゼロまで低下します。GaN デバイスは ZCD 信号を生成します。式 3 で計算された遅延時間を ENABLE ウィンドウで AND 処理すると、RESET 信号が生成されます。RESET 信号は PWM をリセットします。同期スイッチは公称スイッチング周期の終了前にオフとなり、その後、次のスイッチング周期が開始されます。実際のスイッチング周波数は、公称スイッチング周波数よりも低くなっています。図 7 に示すように、PFC は TCM PFC として動作します。

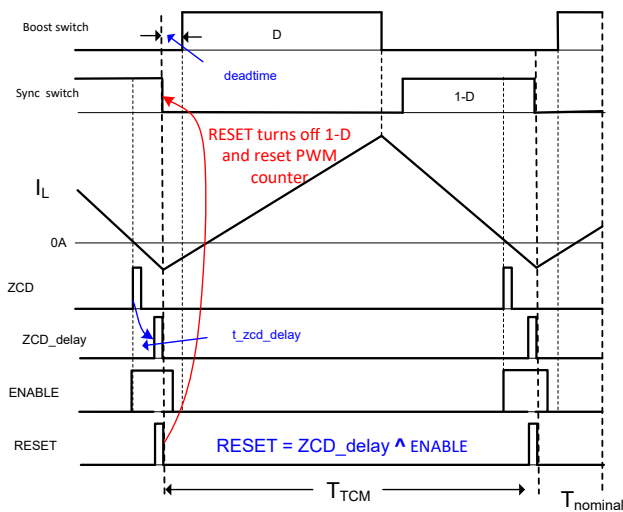


図7. AC ゼロ交差付近での TCM 動作

ダイナミック デッドタイム

CCM では、デッドタイム (同期スイッチがオフしてからブーストスイッチがオンするまでの時間) を最小限に抑えることで、ブ

ーストスイッチのボディダイオードの導通時間を低減できます。TCM では、同期スイッチがオフになると、スイッチノード電圧を放電または充電するために時間が必要となります。したがって、デッドタイムはこれより長くする必要があります。CCM と TCM の間でデッドタイムを動的に調整することで、効率を最適化できます。

制御則および PWM 生成

従来の TCM 動作では電圧ループのみが存在し、電流ループはありません。昇圧スイッチのターンオン時間は、一定の T_{on} 制御方法によって決定されます。マルチモード制御方式では、図 8 に示す従来型の平均電流モードコントローラは、TCM と CCM の両方の動作の PWM デューティサイクルを生成します。このコントローラは外部電圧ループ (G_V) と内部電流ループ (G_I) を備えています。 G_V の出力は、検出された入力電圧によって変調され、電流ループの電流コマンドとなります。同一の補償器が CCM と TCM の両方において PWM デューティサイクルを生成するため、モード遷移はスムーズであり、遷移中に電流の歪みは発生しません。

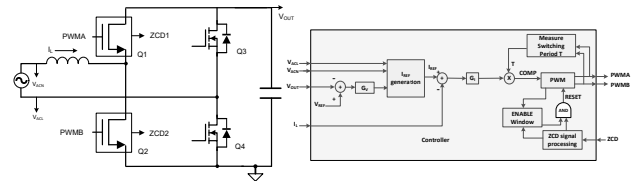


図8. 提案されている CCM_TCM 制御のブロック図

マイコンでは、COMP 値と RAMP 信号を比較することで PWM 信号を生成します。ここで、COMP は式 4 に示すように、電流ループ G_I の出力にスイッチング周期 T を乗じることで計算されます：

$$COMP = G_I \times T \quad (4)$$

従来の CCM 動作では、スイッチング周期 T は一定です。しかし、TCM 動作では実際のスイッチング周期は RESET 信号によって決定され、 T よりも短くなります。式 4 を使用すると、PWM パルス幅が必要よりも長くなり、 G_I の補償が難しくなります。 G_I をより高い帯域幅にプッシュすると役に立ちますが、ループが不安定になる可能性があります。

この問題を解決するには、コントローラが実際のスイッチング周期を測定し続けさせます。式 5 と図 9 に示すように、 G_I 出

力に、前のスイッチングサイクルから測定されたスイッチング周期を乗算して、COMP 値を計算します。式 5 が有効になるという理由です。PWM 周期は、連続した 2 サイクルでほぼ同じであるからです。

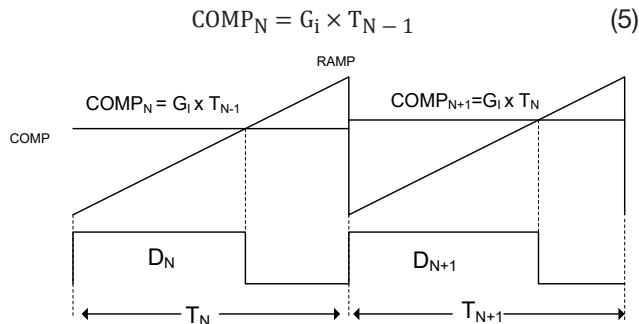


図9. PWM 生成

テスト結果

この制御方式は、3.6KW のトータムポール型ブリッジレス PFC [1] に実装されています。最大スイッチング周波数は 65KHz であり、最小スイッチング周波数は 45KHz に設定されています。このコントローラは、TI の TMS320F280039C リアルタイム マイコンを使用しています。高周波スイッチには、ZCD 回路を内蔵した LMG3427R030 GaN FET が使われています。65KHz の割り込みサービス ルーチン 1 (ISR1) は電流ループおよび ZCD 遅延時間の計算を実行し、10KHz の割り込みサービス ルーチン 2 (ISR2) は電圧ループを実行します。ZCD 遅延、ENABLE ウィンドウ、AND ロジック、および実際のスイッチング周期の測定は、TMS320F280039C のコンフィギュラブル ロジック ブロック (CLB) によって実装されています。構成後、CLB は CPU に関係なく独立して動作します。

この設計では、 $180\text{W}/\text{in}^3$ を超える電力密度を達成し、軽負荷時においても優れた効率を実現しています。図 10 と図 11 に、この提案する制御方式と従来の CCM 制御との効率の比較 (同じ基板でテスト) を示し、軽負荷時の効率は最大 2% 改善されています。

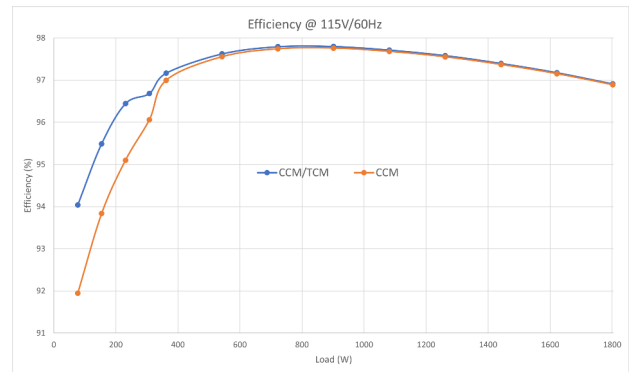


図10. 低ラインでの効率の比較

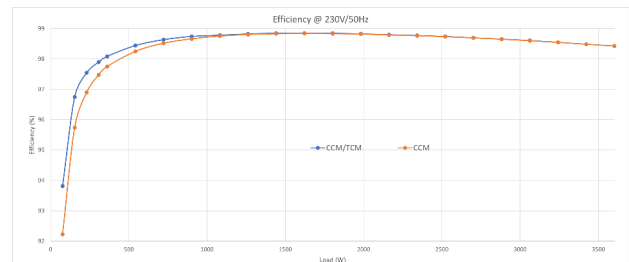


図11. 高ラインでの効率の比較

図 12 に、50% 負荷での入力電流波形を示します。この図では、モード遷移時に電流歪みは発生していません。

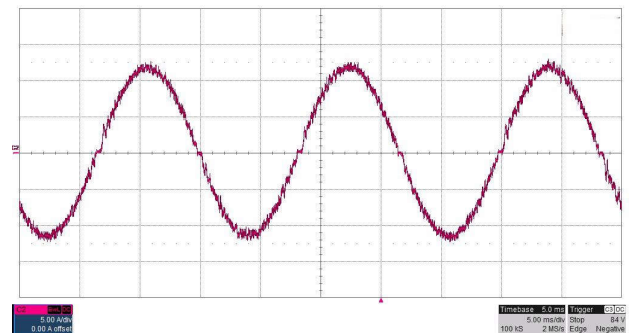


図12. 50% 負荷時の入力電流の波形

まとめ

トータムポール型ブリッジレス PFC は、重負荷時または AC のピーク付近では CCM で動作させ、軽負荷時または AC のゼロ交差付近では ZVS を伴う TCM に切り替えることで、CCM-TCM マルチモード動作により高効率と高電力密度の両方を実現できます。CCM-TCM マルチモードは軽負荷時の効率を大幅に向上させ、モード遷移時に入力電流歪みは発生しません。これは、80 Plus Ruby の効率要件が求められるアプリケーションにおいて非常に有用です。

参考資料

1. テキサス インストルメンツ (発行年記載なし)「**3.6kW CCM-TCM マルチモード制御トータムポール ブリッジレス PFC のリファレンス デザイン**。」テキサス インストルメンツのリファレンス デザイン No. PMP23537。アクセス日:2025 年 2 月 16 日。

著者について

Bosheng Sun はテキサス インストルメンツのシステム エンジニアであり、サーバーおよび産業用途向けのデジタル制御による高性能 AC/DC ソリューションの開発に注力しています。2003 年にクリーブランド州立大学で電気工学の理学士号を取得し、1995 年に北京の清華大学で電気工学の理学士号を取得しました。彼は 6 つの米国特許を持っています。

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インストルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

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](#)、[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