

Technical Article

トータムポールブリッジレス PFC の制御ループを閉じる 3 つの方法



Bosheng Sun

はじめに

すべての力率補正 (PFC) トポロジの中で、トータムポールブリッジレス PFC は最高の効率を実現しているため、サーバーとデータセンターで広く使用されています。ただし、連続導通モード (CCM) のトータムポールブリッジレス PFC の電流制御ループを閉じることは、従来型の PFC ほど簡単ではありません。CCM で動作する従来型の PFC は、図 1 に示すように、平均電流モードコントローラ [1] を使用します。ここで、 V_{REF} は電圧ループ基準、 V_{OUT} は検出された PFC 出力電圧、 G_V は電圧ループ、 V_{IN} は検出された PFC 入力電圧、 I_{REF} は電流ループ基準、 I_{IN} は検出された PFC インダクタ電流、 G_I は電流ループ、 d はパルス幅変調 (PWM) のデューティ比です。ブリッジ整流器は従来型の PFC で使用されるため、これらすべての値は正であり、電流帰還信号 I_{IN} は整流された入力電流信号となります。

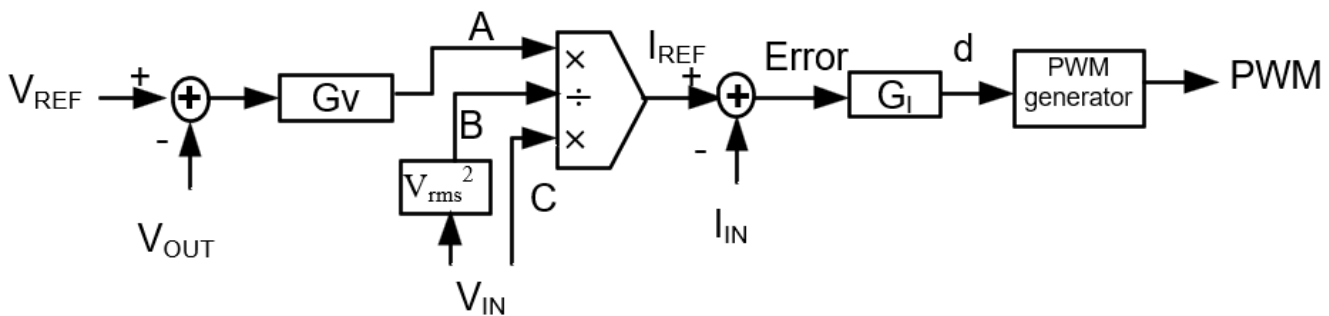


図 1. 記載されているすべてのパラメータは正の値、 I_{IN} は整流された入力電流信号である PFC の平均電流モードコントローラ。出典: テキサス・インスツルメンツ

新しい帰還信号

トータムポールブリッジレス PFC のインダクタ電流は双方向なので、従来型の PFC で使用されている電流センス方式は動作しません。代わりに、双方向インダクタ電流を検出して制御ループに帰還信号を提供するための、ホール効果センサなどの双方向電流センサが必要になります。

ただし、ホール効果センサの出力は、検出された電流と 100% 一致しません。たとえば、検出された電流が正弦波の場合、図 2 に示すように、ホール効果センサの出力は DC オフセット付きの正弦波になります。したがって、図 1 に示す電流モードコントローラで帰還信号として使用できないため、この新しい帰還信号に対応してコントローラを変更する必要があります。このパワー ヒントでは、この新しい帰還信号を使用して電流制御ループを閉じる 3 つの方法について説明します。

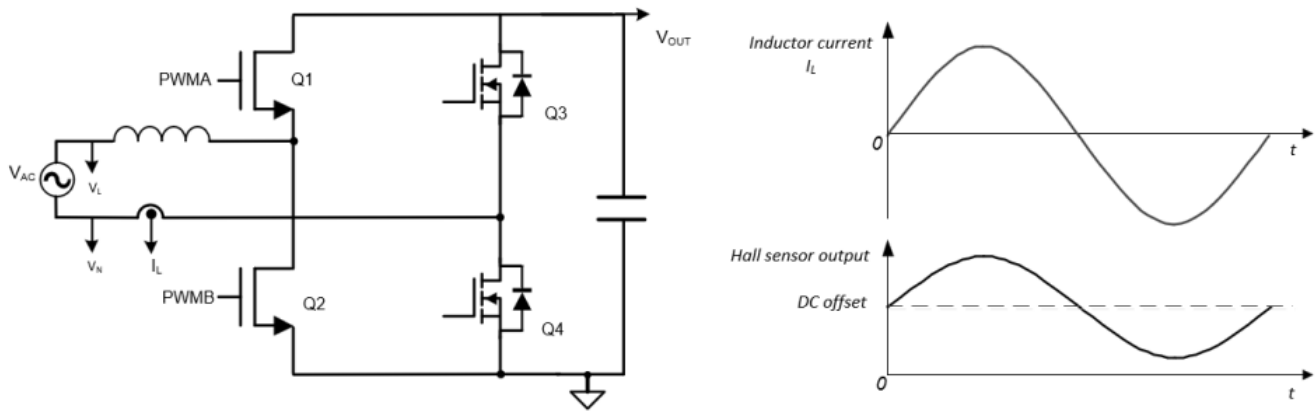


図 2. トーテムポールブリッジレス PFC と、ホール効果センサの出力が検出された電流と 100% 一致しないことを示す電流センス信号。出典: テキサス・インスツルメンツ

方法 1: 負のループ基準を持たないコントローラ

テキサス・インスツルメンツ (TI) の UCD3138 など、一部のデジタル コントローラはハードウェア ステート マシンを使用して制御ループを実装しています。したがって、ステート マシンへのすべての入力信号はゼロ以上である必要があります。このような場合は、電流制御ループを閉じるために、以下の手順に従います。

1. 2 個の A/D コンバータ (ADC) を個別に使用して、AC ライン電圧と AC ニュートラル電圧を検出します。
2. 式 1 と図 3 に示すように、ファームウェアを使用して検出された V_{AC} 信号を整流します。

$$\begin{aligned} &\text{if } (V_L > V_N) * V_{IN} = V_L - V_N \\ &\text{else } V_{IN} = V_N - V_L \end{aligned} \quad (1)$$

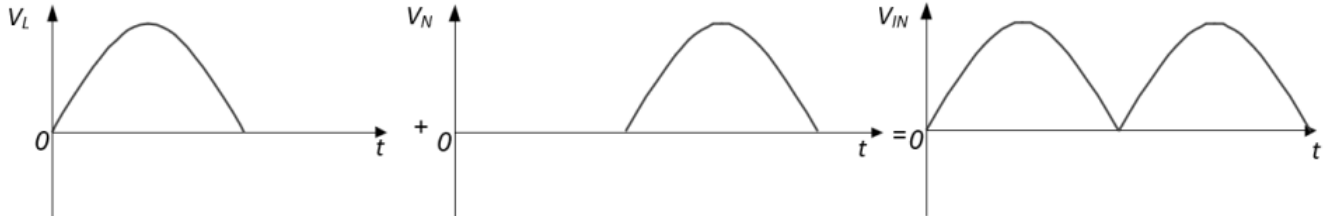


図 3. 式 1 に示すファームウェアを使用して、検出された入力電圧 V_{AC} を整流。出典: テキサス・インスツルメンツ

3. 式 2 および図 4 に示すように、従来型の PFC で I_{REF} を計算するときと同じ方法を使用して、正弦波リファレンス電圧 V_{SINE} を計算します。

$$V_{SINE} = \frac{G_V \times V_{IN}}{V_{IN_RMS}^2} \quad (2)$$

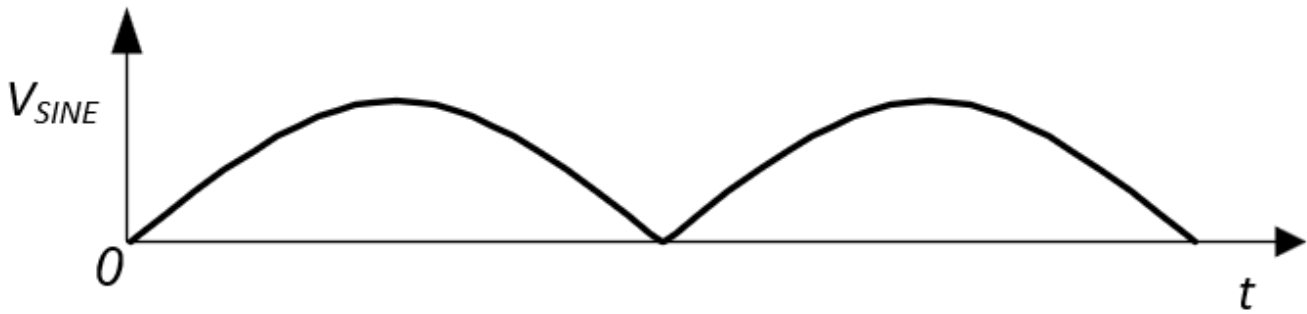


図 4. 従来型の PFC で I_{REF} を計算するときと同じ方法を使用して、正弦波リファレンス電圧 (V_{SINE}) を計算。出典: テキサス・インスツルメンツ

4. ホール効果センサ出力を、電流帰還信号 I_{IN} として直接使用します (式 3)。

$$I_{IN} = \text{Hall - effect sensor output} \quad (3)$$

5. 正の AC サイクルの間、 V_{SINE} とホール効果センサ出力の形状を比較すると、これらの形状は同じになります。唯一の違いは DC オフセットです。式 4 を使用して、電流ループ基準 I_{REF} を計算します。

$$I_{REF} = V_{SINE} + \text{DC offset} \quad (4)$$

6. 制御ループには標準的な負の帰還制御があります。式 5 を使用して、制御ループに流入する誤差を計算します。

$$\text{Error} = I_{REF} - I_{IN} \quad (5)$$

7. 負の AC サイクルの間、 V_{SINE} とホール効果センサの出力の形状を比較すると、DC オフセットだけでなく、これらの形状も反対になります。式 6 を使用して、電流ループ基準 I_{REF} を計算します。

$$I_{REF} = \text{DC offset} - V_{SINE} \quad (6)$$

8. 負の AC サイクル中は、インダクタ電流が大きいほど、ホール効果センサの出力値は小さくなります。制御ループは、負の帰還から正の帰還に変更する必要があります。式 7 を使用して、制御ループに流入する誤差を計算します。

$$\text{Error} = I_{IN} - I_{REF} \quad (7)$$

方法 2: 純粋なファームウェア ベースのコントローラ

TI C2000 マイコンのような純粋なファームウェアベースのデジタル コントローラの場合、制御ループはファームウェアで実装されているため、内部計算パラメータは正の値にも負の値にもなります。このような場合は、電流制御ループを閉じるために、以下の手順に従います。

1. 2 個の ADC を使用して、AC ライン電圧と AC ニュートラル電圧を検出します。次に、ライン電圧を使用してニュートラル電圧を減算すると、式 8 および図 5 に示すように、 V_{IN} が得られます。

$$V_{IN} = V_L - V_N \quad (8)$$

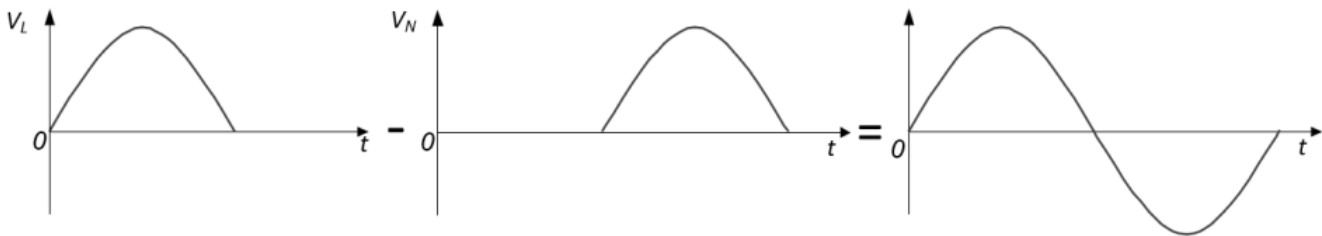


図 5. ライン電圧を使用してニュートラル電圧を減算した後で、 V_{IN} を計算。出典: テキサス・インスツルメンツ

2. 式 9 および図 6 に示すように、従来型の PFC と同じ方法を使用して、正弦波電流ループ基準 I_{REF} を計算します。

$$I_{REF} = \frac{G_V \times V_{IN}}{V_{IN_RMS}^2} \quad (9)$$

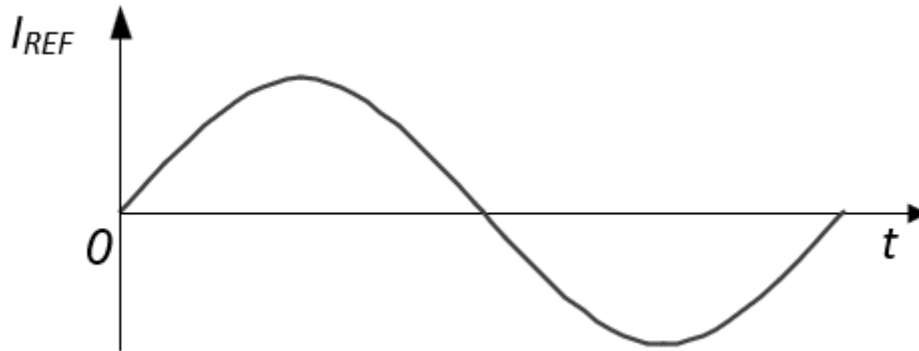


図 6. 従来型の PFC と同じ方法で I_{REF} を計算。出典: テキサス・インスツルメンツ

3. I_{REF} とホール効果センサの出力の形状を比較すると、これらの形状は同じですが、DC オフセットのみが違います。式 10 を使用して、入力電流帰還信号 I_{IN} を計算します。図 7 に波形を示します。

$$I_{IN} = \text{Hall sensor output} - \text{DC offset} \quad (10)$$

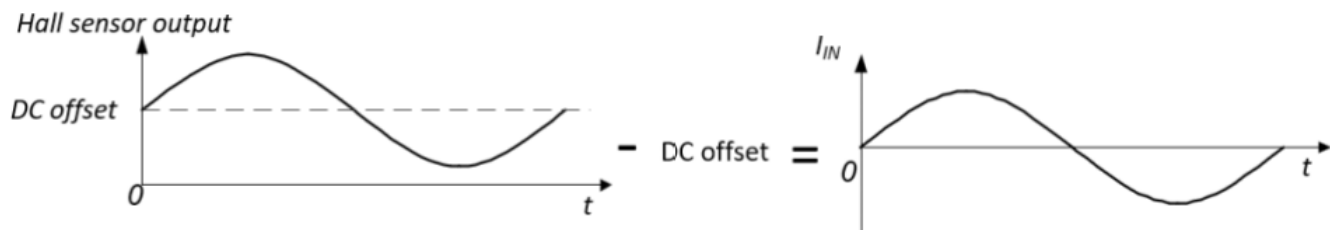


図 7. I_{IN} を計算するためのホール センサ出力と DC オフセットの波形。出典: テキサス・インスツルメンツ

4. 正の AC サイクル中、制御ループは標準的な負の帰還制御を行います。式 11 を使用して、制御ループに流入する誤差を計算します。

$$\text{Error} = I_{REF} - I_{IN} \quad (11)$$

5. 負の AC サイクル中、インダクタ電流が大きいほど、ホール効果センサの出力値は小さくなります。したがって、制御ループを負の帰還から正の帰還に変更する必要があります。式 12 を使用して、制御ループに流入する誤差を計算します。

$$\text{Error} = I_{IN} - I_{REF} \quad (12)$$

方法 3: デューティ比フィードフォワード制御

全高調波歪み (THD) に関する要件は、特にサーバーやデータセンターのアプリケーションで厳しくなっています。THD を低減するには、制御ループの帯域幅をより広くする必要があります。帯域幅が広いと位相マージンが減少し、ループが不安定になります。また、PFC スイッチング周波数が制限されていることも、帯域幅が非常に広がることを防止します。この問題を解決するために、事前に計算されたデューティサイクルを制御ループに追加して PWM を生成することができます。これを、デューティ比フィードフォワード制御 (d_{FF}) [2]、[3] と呼びます。

CCM モードで動作する昇圧トポロジの場合、式 13 から d_{FF} を計算します。

$$d_{FF} = \frac{V_{OUT} - V_{IN}}{V_{OUT}} \quad (13)$$

このデューティ比パターンでは、スイッチング サイクル全体の平均値が整流された入力電圧と等しくなるように、効果的にスイッチ両端に電圧が生成されます。通常の電流ループ補償器は、この計算されたデューティ比パターンを中心にして、デューティ比を変化させます。ライン周波数における昇圧インダクタのインピーダンスは非常に低いため、デューティ比がわずかに変動すると、インダクタ両端に必要な正弦波電流波形が生成されるのに十分な電圧が生成され、電流ループ補償器の帯域幅を広くする必要がありません。

その結果の制御方式を **図 8** に示します。計算された d_{FF} を従来の平均電流モード制御出力 d_I に追加すると、PFC を制御するために PWM 波形の生成に使用される最終的なデューティ比 d が得られます。

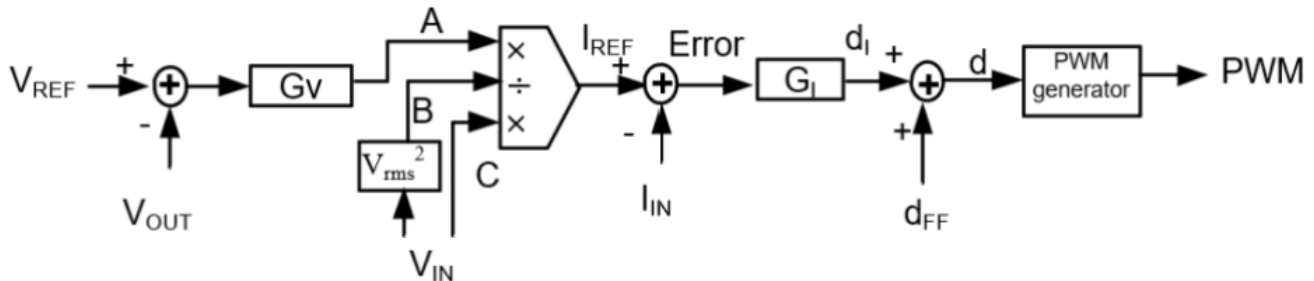


図 8. PFC のデューティ比フィードフォワード制御。計算された d_{FF} を従来の平均電流モード制御出力 d_I に追加すると、PFC を制御するために PWM 波形を生成するために使用される最終的なデューティ比 d が得られます。出典:テキサス・インスツルメンツ

トータムポール ブリッジレス PFC で d_{FF} の利点を活用するには、次の手順に従って電流ループを閉じます。

1. 方法 2 の手順 1、2、3、4、5 に従います。
2. 式 14 に示すように、 d_{FF} を計算します。 V_{IN} は正弦波で、負の AC サイクルの間でその値は負であるため、計算にはその絶対値を使用します。

$$d_{FF} = \frac{V_{OUT} - |V_{IN}|}{V_{OUT}} \quad (14)$$

3. 式 15 を使用して、 d_{FF} を G_I 出力 d_I に追加し、最終的な d を得ます。

$$d = d_I + d_{FF} \quad (15)$$

また、ハードウェア ステート マシン ベースのコントローラに d_{FF} 制御を使用することもできます。詳細については、リファレンス [2] を参照してください。

電流ループの閉鎖

トータムポール ブリッジレス PFC の電流ループを閉じることは、従来型の PFC ほど簡単ではありません。また、コントローラによって異なることもあります。このパワー ヒントは、トータムポール ブリッジレス PFC で制御ループを実装する際の混乱を解消し、設計に適した方法を選択するのに役立ちます。

関連コンテンツ

- [パワー ヒント #108: ブリッジレストータムポール PFC \(力率補正\) 用途での電流センシングに関する検討事項](#)
- [インターリーブ昇圧とトータムポールの各 PFC トポロジの比較](#)
- [パワー ヒント #116: PFC の THD を低減する方法](#)
- [パワー ヒント #132: 低コストで高精度の e メーター ソリューション](#)

参考資料

1. Dixon, Lloyd. 『オフライン電源向けの力率の高いプリレギュレータ』テキサス・インスツルメンツ パワー サプライ デザイン セミナー SEM600、文献番号 SLUP087、1988 年。
2. Sun, Bosheng. 『デジタル制御 PFC のデューティ比フィードフォワード制御』電源システム設計、2014 年 12 月 3 日。

3. Van de Sype, David M., Koen De Gussme é, Alex P.M. Van den Bossche, Jan A. Melkebeek. 『デジタル制御昇圧 PFC コンバータのデューティ比フィードフォワード』IEEE Transactions on Industrial Electronics 52, no. 1 (2005 年 2 月), pp. 108~115。

この記事は、以前 EDN.com で公開された記事です。

商標

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

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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

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 © 2025, Texas Instruments Incorporated