

## Technical Article

## 토템 폴 브리지리스 PFC의 제어 루프를 닫는 세 가지 방법



Bosheng Sun

## 머리말

모든 PFC(역률 보정) 토폴로지 중에서 토템 폴 브리지리스 PFC는 최고의 효율성을 가지고 있어 서버와 데이터 센터에서 널리 사용됩니다. 그러나 CCM(연속 전도 모드) 토템 폴 브리지리스 PFC의 전류 제어 루프를 닫는 것은 기존 PFC처럼 간단하지 않습니다. CCM에서 작동하는 기존의 PFC는 [그림 1](#)에서 볼 수 있듯이 평균 전류 모드 컨트롤러 [1]을 사용합니다. 여기서  $V_{REF}$ 는 전압 루프 레퍼런스,  $V_{OUT}$ 은 감지된 PFC 출력 전압,  $G_V$ 는 전압 루프,  $V_{IN}$ 은 감지된 PFC 입력 전압,  $I_{REF}$ 는 전류 루프 레퍼런스,  $I_{IN}$ 은 감지된 PFC 인덕터 전류,  $G_I$ 는 전류 루프,  $d$ 는 PWM(펄스 폭 변조)의 듀티 비율입니다. 기존 PFC에는 브리지 정류기가 사용되므로 이 모든 값은 양수이며 전류 피드백 신호  $I_{IN}$ 은 정류된 입력 전류 신호입니다.

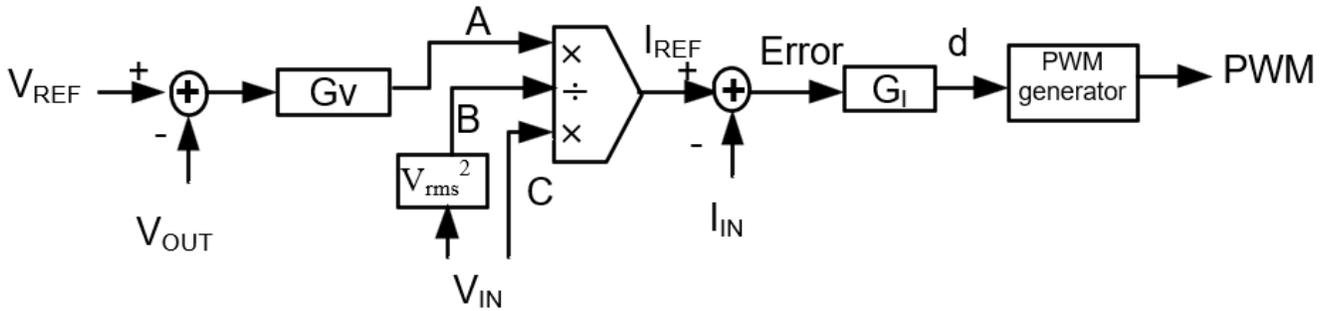


그림 1. 나열된 모든 매개 변수가 양수이고  $I_{IN}$ 이 정류된 입력 전류 신호인 PFC용 평균 전류 모드 컨트롤러. 출처: 텍사스 인스트루먼트

## 새로운 피드백 신호

토템 폴 브리지리스 PFC의 인덕터 전류는 양방향이므로 기존의 PFC에 사용되는 전류 감지 방법이 작동하지 않습니다. 대신 양방향 인덕터 전류를 감지하고 제어 루프에 피드백 신호를 제공하기 위해 홀 효과 센서와 같은 양방향 전류 센서가 필요합니다.

하지만 홀 효과 센서의 출력은 감지된 전류와 100% 일치하지 않습니다. 예를 들어, 감지된 전류가 사인파인 경우 홀 효과 센서의 출력은 [그림 2](#)에 나와 있는 것처럼 DC 오프셋이 있는 사인파입니다. 따라서 이를 [그림 1](#)에 나와 있는 전류 모드 컨트롤러의 피드백 신호로 사용할 수 없으며, 이 새로운 피드백 신호를 수용하도록 컨트롤러를 수정해야 합니다. 이 전원 팀에서는 이 새로운 피드백 신호를 사용하여 전류 제어 루프를 닫는 세 가지 방법을 설명합니다.

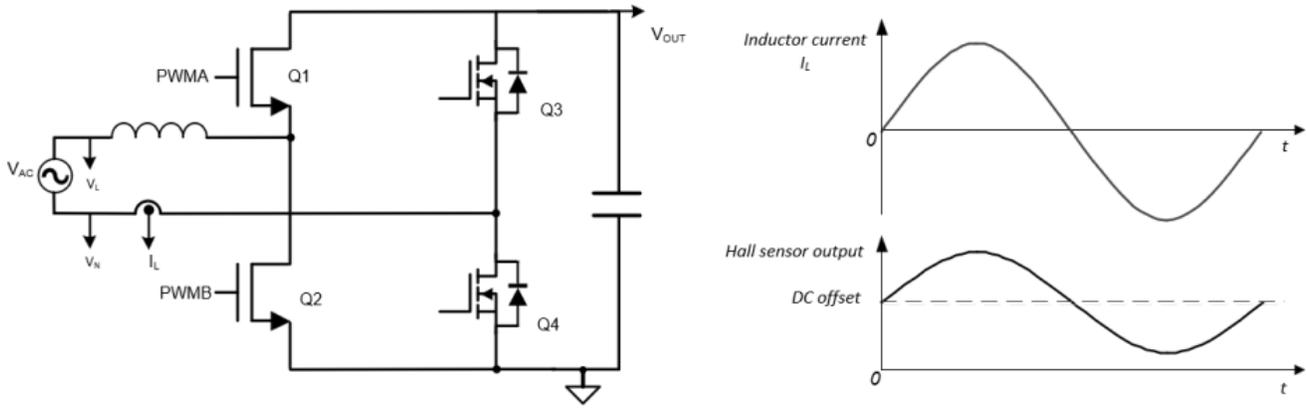


그림 2. 홀 효과 센서 출력이 감지된 전류와 100% 일치하지 않는다는 것을 보여주는 토템폴 브리지리스 PFC 및 전류 감지 신호. 출처: 텍사스 인스트루먼트

### 방법 1: 음극 루프 레퍼런스가 없는 컨트롤러

TI(텍사스 인스트루먼트)의 UCD3138과 같은 일부 디지털 컨트롤러는 하드웨어 상태 시스템을 사용하여 제어 루프를 구현합니다. 따라서 상태 시스템으로의 모든 입력 신호는 0보다 크거나 같아야 합니다. 이러한 경우 다음 단계에 따라 전류 제어 루프를 닫으십시오.

1. 두 개의 ADC(아날로그-디지털 컨버터)를 통해 AC 라인과 AC 중립 전압을 별도로 감지합니다.
2. 펌웨어를 사용하여 방정식 1과 그림 3에 나와 있는 것처럼 감지된  $V_{AC}$  신호를 수정합니다.

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

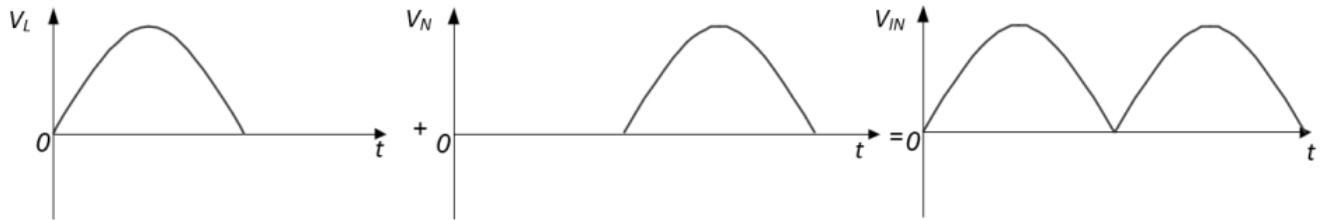


그림 3. 방정식 1에 표시된 펌웨어를 사용하여 감지된 입력 전압  $V_{AC}$  수정. 출처: 텍사스 인스트루먼트

3. 방정식 2와 그림 4에 나와 있는 것처럼 기존 PFC에서  $I_{REF}$ 를 계산할 때와 동일한 방법을 사용하여 시누소이드 레퍼런스  $V_{SINE}$ 을 계산합니다.

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

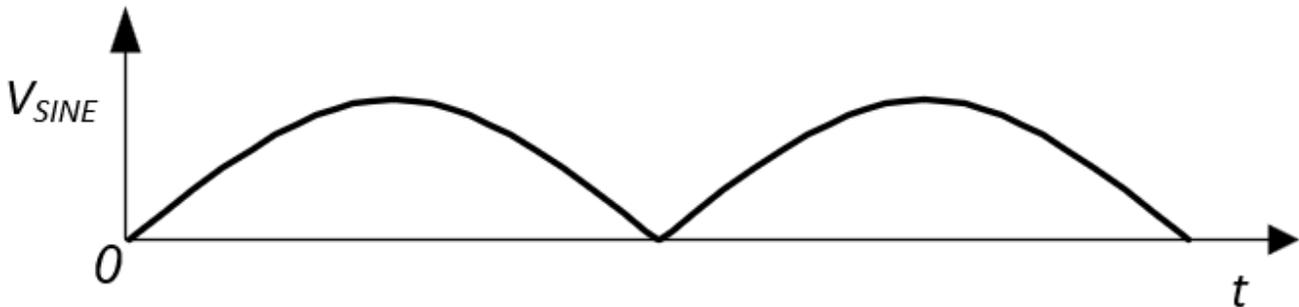


그림 4. 기존 PFC에서  $I_{REF}$ 를 계산할 때와 동일한 방법을 사용하여 시누소이드 레퍼런스( $V_{SINE}$ ) 계산. 출처: 텍사스 인스트루먼트

4. 홀 효과 센서 출력을 직접 전류 피드백 신호  $I_{IN}$ 으로 사용합니다(방정식 3).

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

5. 양극 AC 사이클 동안  $V_{SINE}$ 의 모양과 홀 효과 센서 출력의 모양을 비교하면 동일합니다. 유일한 차이점은 DC 오프셋입니다. 방정식 4를 사용하여 전류 루프 참조  $I_{REF}$ 를 계산합니다.

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

6. 제어 루프에는 표준 음극 피드백 제어가 있습니다. 방정식 5를 사용하여 제어 루프로 전달되는 오류를 계산합니다.

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

7. 음극 AC 사이클 동안  $V_{SINE}$ 의 모양과 홀 효과 센서 출력의 모양을 형태를 비교하면 DC 오프셋만 다른 것이 아니라 모양이 반대입니다. 방정식 6를 사용하여 전류 루프 참조  $I_{REF}$ 를 계산합니다.

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

8. 음극 AC 사이클 동안 인덕터 전류가 높을수록 홀 효과 센서 출력의 값이 낮아집니다. 제어 루프를 음극 피드백에서 양극 피드백으로 변경해야 합니다. 방정식 7를 사용하여 제어 루프로 전달되는 오류를 계산합니다.

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

## 방법 2: 순수 펌웨어 기반 컨트롤러

TI C2000 마이크로컨트롤러와 같은 순수 펌웨어 기반 디지털 컨트롤러의 경우 제어 루프가 펌웨어와 함께 구현되므로 내부 계산 매개 변수가 양수 또는 음수일 수 있습니다. 이러한 경우 다음 단계에 따라 전류 제어 루프를 닫으십시오.

1. 두 개의 ADC를 통해 AC 라인 및 AC 중립 전압을 감지합니다. 그런 다음 방정식 8과 [그림 5](#)에 나와 있는 것처럼 라인 전압을 사용하여 중립 전압을 빼서  $V_{IN}$ 을 구합니다.

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

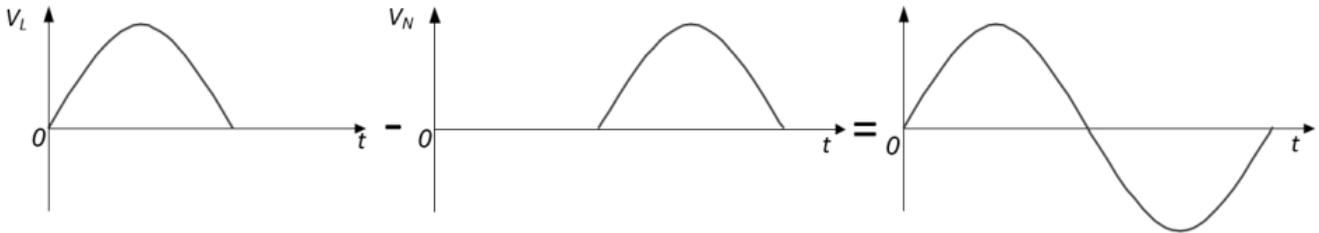


그림 5. 라인 전압을 사용하여 중립 전압을 뺀 후  $V_{IN}$  계산. 출처: 텍사스 인스트루먼트

2. 방정식 9와 [그림 6](#)에 나와 있는 것처럼 기존 PFC와 동일한 방법을 사용하여 시누소이드 전류 루프 레퍼런스인  $I_{REF}$ 를 계산합니다.

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

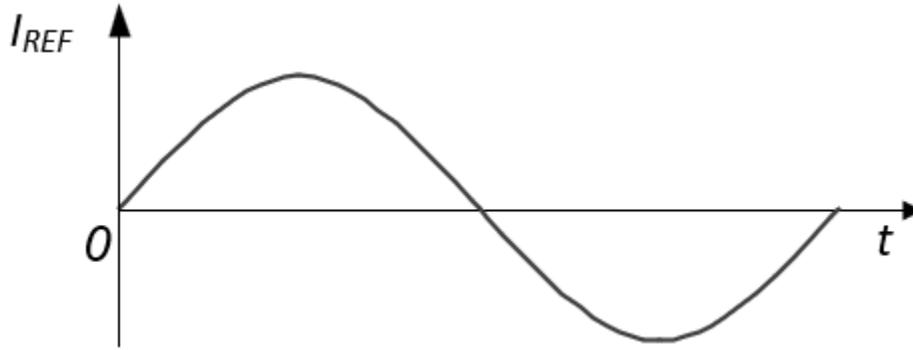


그림 6. 기존 PFC와 동일한 방법을 사용하여  $I_{REF}$  계산. 출처: 텍사스 인스트루먼트

3.  $I_{REF}$ 의 모양과 홀 효과 센서 출력의 모양을 비교하면 같으며, 유일한 차이점은 DC 오프셋입니다. 방정식 10을 사용하여 입력 전류 피드백 신호  $I_{IN}$ 을 계산합니다. 그림 7에 파형이 나와 있습니다.

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



그림 7.  $I_{IN}$ 을 계산하기 위한 홀 센서 출력 및 DC 오프셋의 파형. 출처: 텍사스 인스트루먼트

4. 양극 AC 사이클 동안 제어 루프에는 표준 음극 피드백 제어가 있습니다. 방정식 11을 사용하여 제어 루프로 전달되는 오류를 계산합니다.

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

5. 음극 AC 사이클 동안 인덕터 전류가 높을수록 홀 효과 센서 출력의 값이 낮아지기 때문에 제어 루프를 음극 피드백에서 양극 피드백으로 변경해야 합니다. 방정식 12를 사용하여 제어 루프로 전달되는 오류를 계산합니다.

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

### 방법 3: 듀티 비율 피드포워드 제어

THD(총 고조파 왜곡) 요구 사항이 더 엄격해지고 있습니다. 특히 서버 및 데이터 센터 애플리케이션에서 더욱 그렇습니다. THD를 줄이면 제어 루프 대역폭이 점점 더 높아집니다. 높은 대역폭은 위상 여유를 줄여 루프 불안정성을 초래합니다. 제한된 PFC 스위칭 주파수는 대역폭이 매우 높아지는 것도 방지합니다. 이 문제를 해결하기 위해 제어 루프에 미리 계산된 듀티 사이클을 추가하여 PWM을 생성할 수 있습니다. 이를 듀티 비율 피드포워드 제어( $d_{FF}$ )[2], [3]이라고 합니다.

CCM 모드에서 작동하는 부스트 토폴로지의 경우, 방정식 13을 사용하면  $d_{FF}$ 가 다음과 같이 계산됩니다.

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

이 듀티 비율 패턴은 스위치 전체에 걸쳐 전압을 효과적으로 생성하며, 스위칭 주기에 대한 평균이 정류 입력 전압과 같습니다. 일반 전류 루프 보상기는 이 계산된 듀티 비율 패턴을 중심으로 듀티 비율을 변경합니다. 라인 주파수에서 부스트 인덕터의 임피던스가 매우 낮기 때문에, 듀티 비율이 조금만 변해도 인덕터 전압에서 충분한 전압을 생성하여 필요한 시누소이드 전류 파형을 생성하므로 전류 루프 보상기가 높은 대역폭을 가질 필요가 없습니다.

그림 8은(는) 결과 제어 체계를 보여줍니다. 계산된  $d_{FF}$ 를 기존의 평균 전류 모드 제어 출력  $d_I$ 에 더하면 최종 듀티 비율  $d$ 가 나옵니다. 이는 PFC를 제어하기 위한 PWM 파형을 생성하는 데 사용됩니다.

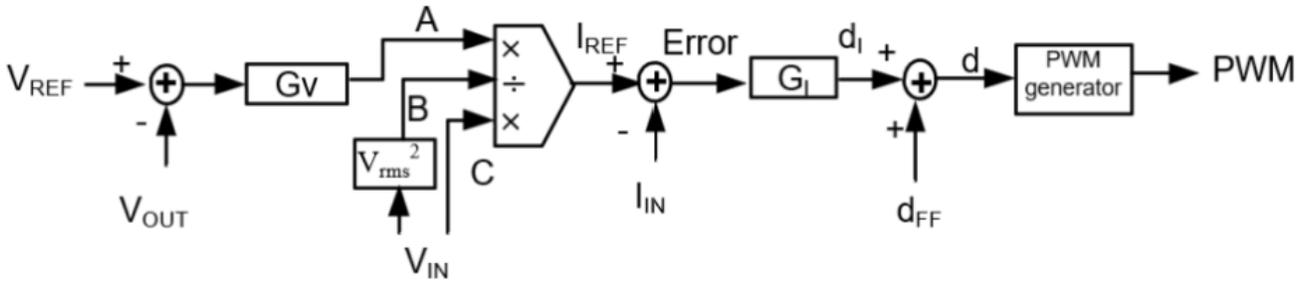


그림 8. PFC의 제어를 위한 듀티 비율 피드포워드. 계산된  $d_{FF}$ 를 기존의 평균 전류 모드 제어 출력  $d_I$ 에 더하여 최종 듀티 비율  $d$ 를 얻으며, 이는 PFC를 제어하기 위한 PWM 파형을 생성하는 데 사용됨. 출처: 텍사스 인스트루먼트

토텐 폴 브리지리스 PFC에서  $d_{FF}$ 의 이점을 활용하려면 다음 단계에 따라 전류 루프를 닫습니다.

1. 방법 2의 1, 2, 3, 4, 5단계를 수행합니다.
2. 방정식 14에 나와 있는 것처럼  $d_{FF}$ 를 계산합니다.  $V_{IN}$ 은 사인파이프고 그 값은 음의 AC 사이클에서 음수이므로 계산에 절댓값을 사용합니다.

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

3. 방정식 15를 사용하여  $d_{FF}$ 를  $G_I$  출력,  $d_I$ 에 더하고 최종  $d$ 를 구합니다.

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

하드웨어 상태 시스템 기반 컨트롤러에  $d_{FF}$  제어를 사용할 수도 있습니다. 자세한 내용은 레퍼런스 [2]를 참조하십시오.

### 전류 루프 닫기

토텐폴 브리지리스 PFC의 전류 루프를 닫는 것은 기존 PFC만큼 간단하지 않으며 컨트롤러마다 다를 수도 있습니다. 이 전원 팁은 토텐 폴 브리지리스 PFC의 제어 루프 구현과 관련된 혼란을 피하고 설계에 적합한 방법을 선택하는 데 도움이 됩니다.

### 관련 콘텐츠

- 전원 팁 #108: 브리지리스 토텐폴 PFC의 전류 감지 고려 사항
- 인터리브 부스트와 토텐 폴 PFC 토폴로지 비교
- 전원 팁 #116: PFC의 THD를 줄이는 방법
- 전원 팁 #132: 저비용 고정밀 전자계량기 솔루션

### 참고 자료

1. Dixon, Lloyd. "오프라인 전원 공급 장치를 위한 고역률 사전 레귤레이터". Texas Instruments Power Supply Design Seminar SEM600, literature No. SLUP087, 1988.
2. Sun, Bosheng. "디지털 제어 PFC의 듀티 비율 피드포워드 제어." 전원 시스템 설계, 2014년 12월 3일.
3. Van de Sype, David M., Koen De Gussemé, Alex P.M. Van den Bossche 및 Jan A. Melkebeek. "디지털 제어 부스트 PFC 컨버터용 듀티 비율 피드포워드." Published in IEEE Transactions on Industrial Electronics 52, no. 1 (February 2005): pp. 108-115.

이전에 EDN.com에 게시되었습니다.

### 상표

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

## 중요 알림 및 고지 사항

TI는 기술 및 신뢰성 데이터(데이터시트 포함), 디자인 리소스(레퍼런스 디자인 포함), 애플리케이션 또는 기타 디자인 조언, 웹 도구, 안전 정보 및 기타 리소스를 "있는 그대로" 제공하며 상업성, 특정 목적 적합성 또는 제3자 지적 재산권 침해에 대한 묵시적 보증을 포함하여(그러나 이에 국한되지 않음) 모든 명시적 또는 묵시적으로 모든 보증을 부인합니다.

이러한 리소스는 TI 제품을 사용하는 숙련된 개발자에게 적합합니다. (1) 애플리케이션에 대해 적절한 TI 제품을 선택하고, (2) 애플리케이션을 설계, 검증, 테스트하고, (3) 애플리케이션이 해당 표준 및 기타 안전, 보안, 규정 또는 기타 요구 사항을 충족하도록 보장하는 것은 전적으로 귀하의 책임입니다.

이러한 리소스는 예고 없이 변경될 수 있습니다. TI는 리소스에 설명된 TI 제품을 사용하는 애플리케이션의 개발에만 이러한 리소스를 사용할 수 있는 권한을 부여합니다. 이러한 리소스의 기타 복제 및 표시는 금지됩니다. 다른 모든 TI 지적 재산권 또는 타사 지적 재산권에 대한 라이선스가 부여되지 않습니다. TI는 이러한 리소스의 사용으로 인해 발생하는 모든 청구, 손해, 비용, 손실 및 책임에 대해 책임을 지지 않으며 귀하는 TI와 그 대리인을 완전히 면책해야 합니다.

TI의 제품은 [ti.com](https://ti.com)에서 확인하거나 이러한 TI 제품과 함께 제공되는 [TI의 판매 약관](#) 또는 기타 해당 약관의 적용을 받습니다. TI가 이러한 리소스를 제공한다고 해서 TI 제품에 대한 TI의 해당 보증 또는 보증 부인 정보가 확장 또는 기타의 방법으로 변경되지 않습니다.

TI는 사용자가 제안했을 수 있는 추가 또는 기타 조건을 반대하거나 거부합니다.

주소: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated