

# 고정 주파수 DCS 제어: 클럭 동기화를 통한 빠른 과도 응답

Chris Glaser  
Senior Member, Technical Staff

## 머리말

COT(Constant-On-Time) 제어 토폴로지의 일반적인 단점은 스위칭 주파수 변동과 외부 클럭과 동기화할 수 없다는 것입니다. 절전 모드(고정 주파수 DCS 제어) 토폴로지로 원활하게 전환되는 TI의 고정 주파수 직접 제어 토폴로지는 빠른 과도 응답을 지원하는 인기 있는 COT DCS 제어 토폴로지를 기반으로 구축되며, 선택적 클럭 동기화로 고정 주파수 작동을 달성하는 오실레이터를 추가합니다. 이러한 조합으로 빠른 과도 응답이 요구되는 애플리케이션과 특정 잡음 또는 주파수 요구 사항이 있는 애플리케이션이 가능합니다.

차동 원격 센서, 외부 제어 루프 보상 및 적층 기능과 같은 다른 기능은 차량용 인포테인먼트 및 ADAS(고급 운전자 지원 시스템), 통신 장비 광학 모듈, 산업용 테스트 및 측정, 의료, 우주 항공 및 방위를 포함하여 잡음에 민감한 애플리케이션에서 사용되는 고전류 프로세서의 까다로운 과도 요구 사항을 지원합니다. 이 문서에서는 고정 주파수 DCS 제어 토폴로지에 대한 개요를 제공하여 탁월한 과도 응답, 상수 및 동기화 가능한 스위칭 주파수, 낮은 리플 절전 모드 및 더 높은 전류의 스택 기능에 대해 설명합니다.

## DCS 제어 토폴로지 개요

그림 1에는 DCS 제어 토폴로지 [1]의 기본 블록 다이어그램 나와 있습니다. 출력 전압 감지(VOS)와 피드백(FB) 핀 모두 적절한 조정을 위해 제어 루프에 입력을 제공합니다. VOS 핀은 출력 전압을 램프로 직접 공급한 다음 콤퍼레이터에 공급하여 토폴로지의 빠른 과도 응답을 제공합니다. 이 경우 작동 지점에 즉시 영향을 미칩니다. FB 핀은 고도로 정확한 DC 설정값 조절을 제공하는 더 낮은 대역폭 경로입니다. DCS제어에 결합되어 VOS 핀의 AC 경로와 FB 핀의 DC 경로는 부하 과도현상에 빠르게 응답하는 정확한 출력 전압을 제공합니다.

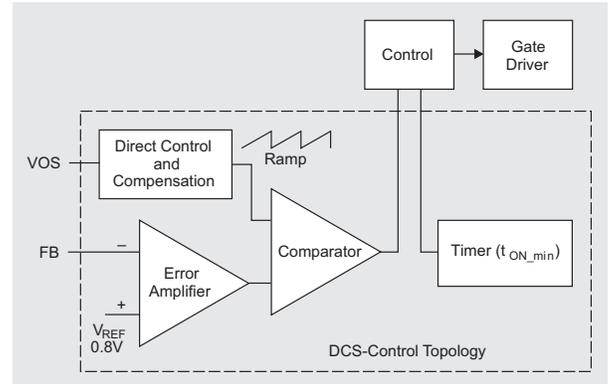


그림 1. DCS 제어 토폴로지의 블록 다이어그램.

DCS 제어와 같은 COT 토폴로지는 타이머로 온타임을 설정합니다. 이 온타임을 입력 및 출력 전압으로 조정함으로써, 타이머는 PWM(펄스 폭 변조) 모드에서 대부분의 듀티 사이클에 대해 합리적으로 일정한 주파수 작동을 제공합니다. **방정식 1**에서는 416ns가 2.4MHz 스위칭 주파수의 기간인 예를 보여줍니다.

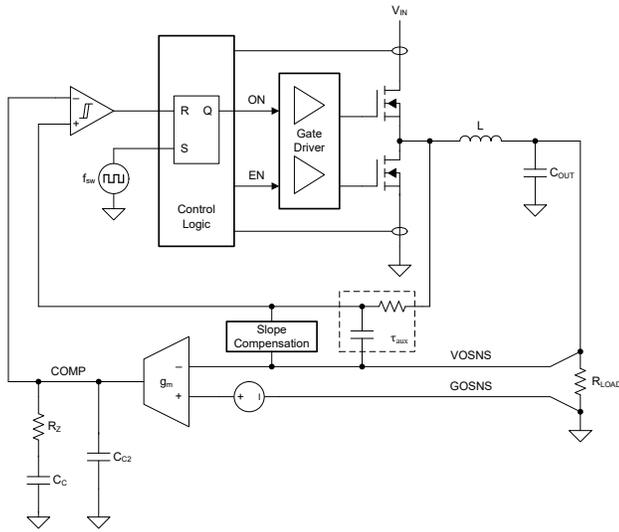
$$t_{ON} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \times 416ns \quad (1)$$

하지만 특정 주파수 대역 내부 또는 외부에서 작동해야 하는 애플리케이션에는 스위칭 주파수가 충분하지 않습니다. 이러한 애플리케이션은 일반적으로 전압 또는 전류 모드 제어와 같은 오실레이터로 스위칭 주파수를 설정해야 하며, 경우에 따라 시스템 클럭 신호와 동기화하는 기능이 있습니다. 레퍼런스[2]는 DCS 제어의 주파수 변동의 추가 예를 제공합니다.

## 고정 주파수 DCS 제어 토폴로지 개요

그림 2에서는 15A TPS62873 벅 컨버터에 구현된 고정 주파수 DCS 제어 토폴로지의 기본 블록 다이어그램을 보여줍니다. 오실레이터를 추가하면 전압 또는 전류 모드 제어와 동일한 방식으로 스위칭 주파수( $f_{sw}$ )를 직접 설정할 수

있습니다. 제어 루프에 오실레이터 입력을 사용하면 스위칭 주파수를 적용된 클럭 신호에 동기화할 수 있는 기능도 제공합니다.



**그림 2.** 오실레이터, 차동 원격 센서, 트랜스컨덕턴스 증폭기 및 이력 콤파레이터를 갖춘 TPS62873의 고정 주파수 DCS 제어 토폴로지의 블록 다이어그램.

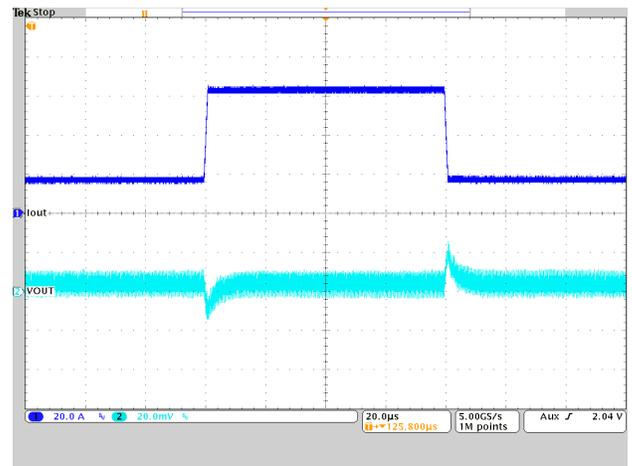
일반적으로 고전류 장치에 사용되는 고정 주파수 DCS 제어는 차동 원격 센서를 사용합니다. 장치는 VOSNS와 GOSNS 핀 사이의 전압을 조정하는데, 이는 PCB(인쇄 회로 보드)를 통해 라우팅되어 부하에서 직접 출력 전압을 감지합니다. 부하의 감지는 PCB 플레인과 트레이스 전반의 DC 전압 강하뿐만 아니라 장치와 부하 사이의 인덕턴스에서 발생하는 지연을 극복하고 보상합니다. 이러한 특성은 부하 범위 전체에 걸쳐 매우 엄격한 레귤레이션을 유지하는 데 중요합니다.

차동 원격 감지 신호는 트랜스컨덕턴스 증폭기( $g_m$ )에 입력되어 있으며, 이는 출력 전압 설정값과 차이를 비교합니다. (단순성을 위해 그림 2이 설정값을 GOSNS 신호와 직렬로 연결된 전압 소스로 표시합니다.) COMP 핀은 이 증폭기의 출력을 제공하며 타입 II(폴 1개, 제로 1개) 네트워크를 접지로 보상합니다.

이 외부 보상을 사용하면 제어 루프를 시스템 요구 사항에 맞게 최적화할 수 있습니다. 출력 커패시턴스가 큰 강력한 부하 과도가 있는 시스템에서 출력 커패시턴스가 매우 작고 크기가 작거나 부하 과도 현상이 없는 시스템까지 모든 요구 사항에 맞게 최적화할 수 있습니다. DCS 제어와 달리 빠른 피드백 경로는 콤파레이터로 바로 연결되지 않고 이

증폭기를 거치며, 보상 구성 요소 선택에 따라 게인을 증가(또는 감소)시킬 수 있습니다. 더 강력한 과도 응답이 필요할 경우 게인을 높이고 출력 커패시턴스를 추가해야 합니다. 애플리케이션에 강력한 과도 현상이 없는 경우, 가장 작은 크기를 구현하기 위해 게인을 줄이고 최소 출력 커패시턴스를 사용합니다.

애플리케이션 요구 사항에 대한 과도 응답을 조정할 수 있는 기능은 이전 DCS 제어 토폴로지보다 가혹한 과도현상에서도 더 엄격한 조정을 가능하게 하며 TI의 Jacinto™ J7 및 MobileEye의 EyeQ6[3-4] 같은 까다로운 프로세서 코어 요구 사항을 충족합니다. 그림 3은 출력 전압을 0.875V 설정값의 ±2% 이내로 유지하면서 46A 부하 과도를 제공하는 세 개의 TPS62876-Q1 벅 컨버터 스택을 보여줍니다.



**그림 3.** 고정 주파수 DCS 제어의 과도 응답은 탁월한 레귤레이션을 제공하는 가장 심각한 부하 과도현상으로 조정할 수 있습니다.

이력 콤파레이터는 COMP 핀 출력과  $\tau_{aux}$  구성 요소에 의해 생성된 인덕터 전류의 복제본을 비교하고 하위 고조파 진동을 방지하기 위해 기울기 보상이 추가되어 있습니다. 콤파레이터의 출력은 클럭과 함께 SR(설정 리셋) 래치 회로를 구동하며, 이는 게이트 드라이버 및 장치 작동을 제어합니다. 오실레이터는 스위칭 주파수에서 정확하게 발생하도록 스위칭을 제어합니다.

설정-리셋 래치는 제어 블록의 자세한 작동 상태를 간단하게 표현하며 DCS 제어의 빠른 히스테리시스 특성을 유지하여 부하 과도현상에 대한 즉각적인 응답을 가능하게 합니다. 예를 들어 부하 덤프 과도 상태(출력 전압이 상승

하는 경우) 동안 이력 콤퍼레이터의 출력이 클럭 신호보다 우선합니다. 컨버터는 필요에 따라 고압측 MOSFET의 오프 타임을 연장하여 최소 오버슈트로 출력 전압을 다시 낮춥니다. 이는 모든 클럭 사이클에서 전환하여 출력이 너무 높을 때에도 계속해서 에너지를 추가하는 교과서적인 피크 전류 모드 제어에 비해 본질적으로 향상된 동작입니다. 출력 전압 오버슈트를 줄이면 컨버터는 출력 커패시턴스를 크게 감소시키며, 이는 전원 공급 장치의 비용과 크기에 큰 영향을 미칩니다.

### 스위칭 주파수 변화

빠른 과도 응답을 유지할 뿐만 아니라 COMP 핀의 외부 보상을 통해 더욱 개선하고 조정할 수 있는 고정 주파수 DCS 제어는 엄격한 공차 사양을 가진 고정 스위칭 주파수를 제공합니다. 스위칭 주파수가 온 타이머로 간접적으로 제어되는 대신 오실레이터로 직접 설정되기 때문에 주파수의 허용 오차는 장치별 데이터 시트에 지정됩니다. 표 1 및 표 2는 고정 주파수 DCS 제어 토폴로지를 사용하는 TPS62876-Q1의 스위칭 주파수 사양과 DCS 제어 TPS62869 스텝 다운 컨버터의 일반 주파수 사양을 비교합니다.

매개변수	테스트 조건	최소값	일반	최대값	단위	
f <sub>sw</sub>	스위칭 주파수	f <sub>sw</sub> = 1.5MHz, PWM 작동	1.35	1.5	1.65	MHz
		f <sub>sw</sub> = 2.25MHz, PWM 작동	2.025	2.25	2.475	
		f <sub>sw</sub> = 2.5MHz, PWM 작동	2.25	2.5	2.75	
		f <sub>sw</sub> = 3MHz, PWM 작동	2.7	3	3.3	

표 1. 고정 주파수 DCS 제어 토폴로지를 사용하는 TPS62876-Q1은 전체 온도 및 입력 전압 범위에서 4개의 스위칭 주파수 옵션의 허용 오차 ± 10%를 지정합니다.

매개변수	테스트 조건	최소값	일반	최대값	단위
f <sub>sw</sub>	PWM 스위칭 주파수	I <sub>OUT</sub> = 1A, V <sub>OUT</sub> = 0.9V		2.4	MHz

표 2. DCS제어를 사용하는 TPS62869는 일반적인 스위칭 주파수만 지정합니다.

그림 4 및 그림 5는 애플리케이션의 스위칭 주파수와 부하 전류의 실제 변화를 비교합니다. 두 장치 모두 낮은 부하 전류에서 주파수를 줄이는 절전 모드를 지원합니다(두 그래프 왼쪽). PWM 모드(높은 전류)에서 작동하면 고정 주파수 DCS 제어에서 정밀하게 제어되는 스위칭 주파수를 제공하는 반면, DCS 제어의 스위칭 주파수는 부하가 증가함

에 따라 약간 증가합니다. 강제 PWM 모드(그림에 없음)에서 고정 주파수 DCS 제어는 무부하까지 일정한 주파수를 유지합니다.

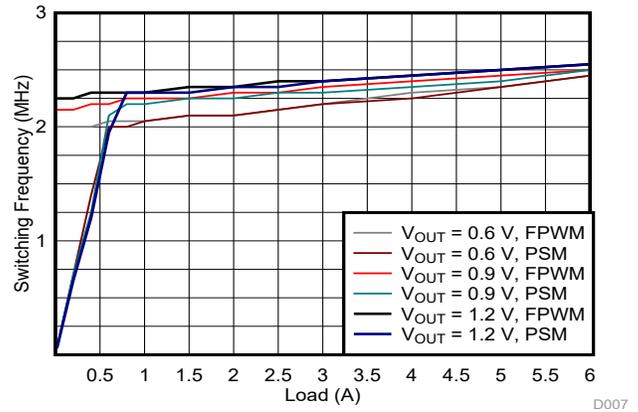


그림 4. DCS 제어를 사용한 TPS62869의 스위칭 주파수 변화.

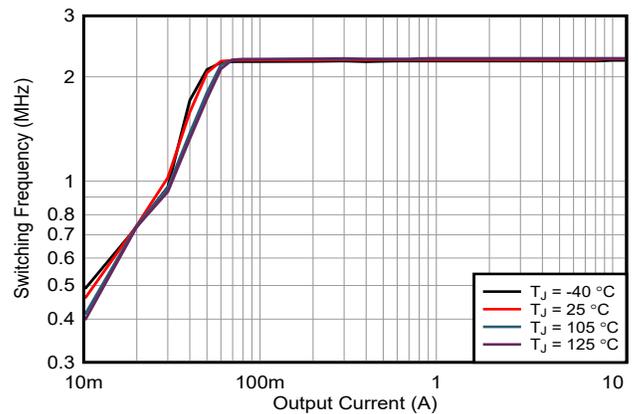


그림 5. 고정 주파수 DCS 제어를 사용한 TPSM8287A12 전원 모듈의 스위칭 주파수 변화.

절전 모드 외에도 스위칭 주파수가 오실레이터가 설정하는 주파수에서 벗어날 수 있는 두 가지 조건이 있습니다. 강력한 부하 과도 현상 동안과 최소 온 타임에 도달할 수 있습니다. 고부하를 적용할 경우 고압측 MOSFET은 전체 스위칭 기간보다 길게 켜져 있을 수 있으며, 고부하를 제거할 경우 전체 스위칭 기간 이상 꺼져 있을 수 있습니다. 두 시나리오 모두 장시간 켜기 또는 끄기 때문에 존재하지 않는 하나 이상의 펄스가 발생합니다.

고압측 MOSFET의 최소 온 타임에 도달하면 고정 주파수 DCS 제어와 DCS제어가 모두 최소 온 타임을 충족하고 출력 전압 조절을 유지하기 위해 스위칭 주파수를 줄입니다. 이는 주파수를 유지하지만 필요한 최소 온 타임을 충족하기 위해 출력 전압이 상승하도록 하는 일부 전류 모드 장치

에 비해 개선된 성능을 제공합니다. 고정 주파수 DCS 제어와 DCS 제어는 모두 스위칭 주파수를 동일한 방식으로 줄이지만<sup>[2]</sup>, 최소 온타임에 도달하고 주파수가 감소하는 작동 조건이 적고, 최소 온 타임이 낮기 때문에 고정 주파수 DCS 제어는 더 낮습니다. 예를 들어 **TPS62876-Q1**은 5V 입력 전압과 작동 온도 전체에서 최소 온 타임의 44ns의 최대 값을 지정합니다. 이처럼 최소 온 타임의 값이 낮기 때문에 자동차 및 우주 항공과 방위의 출력 전압 애플리케이션이 전체 시스템에 필요할 수 있는 더 높은 주파수 영역에서 작동할 수 있습니다.

### 더 낮은 리플 절전 모드

대부분의 애플리케이션이 강제 PWM 모드에서 고정 주파수 DCS 제어 장치를 작동하여 낮은 부하에서 낮은 출력 전압 리플과 더 나은 과도 응답을 얻지만, 토폴로지는 절전 모드를 지원하여 낮은 부하에서 효율을 높입니다. 대상 스위칭 주파수를 유지하고 부하 전류를 낮추도록 더 낮은 리플을 제공하기 위해 고정 주파수 DCS 제어는 절전 모드에서 온 타임을 줄이는 반면, DCS 제어는 온 타임을 일정하게 유지합니다. 두 토폴로지는 인덕터 전류가 비연속적으로 상태가 될 때 절전 모드로 전환되어 PWM 모드에 비해 약간 높은 리플을 생성합니다.

동일한 온 타임으로 주파수를 줄이는 대신 고정 주파수 DCS 제어의 절전 모드로 동일한 주파수를 유지하는 동시에 온 타임이 줄어듭니다. 온 타임을 줄이면 출력에 더 적은 에너지를 제공하여 DCS 제어에 비해 리플 전압을 줄입니다. 온 타임이 최소값으로 감소하면 최소 부하의 경우 스킵 펄스가 출력 전력을 더 줄입니다. 펄스를 건너뛰면 주파수도 줄어듭니다.

**그림 4** 및 **그림 5**는 절전 모드에서 주파수 감소의 차이를 보여줍니다. 고정 주파수 DCS 제어 장치는 60mA 약의 부하 아래로 감소하고, DCS 제어 장치는 약 500mA 이하의 주파수 감소를 시작합니다. 이러한 전류 값은 다양한 장치와 작동 조건에서는 다르지만, 고정 주파수 DCS 제어는 스위칭 주파수를 낮은 부하 전류까지 유지하여 리플을 낮게 유지합니다.

### 더 높은(또는 더 낮은) 부하 전류를 위한 스택킹(병렬)

한편으로 프로세서 코어는 연속적인 프로세서 세대마다 더 높은 전류를 필요로 하는 경우가 많습니다. 반면, 일부 애플리케이션은 특정 프로세서의 모든 기능을 사용하지 않거나 동일한 프로세서 제품군 내에서 성능이 낮은 프로세서를 사용하여 전류 요구 사항이 낮아질 수 있습니다. 전원 공급 장치의 전류 용량을 위 또는 아래로 확장하려면 전류 요구 사항이 변함에 따라 추가 전원 공급 장치 단계를 추가하거나 제거할 수 있는 적층형(병렬 가능) 솔루션이 필요합니다.

고정 주파수 DCS 제어 장치가 스택킹을 지원합니다. 구체적인 구현 세부 사항은 각 장치 제품군마다 약간 다르지만, 전류 공유, 위상 인터리빙 및 인터페이스 단순성 등이 있습니다.

전류 공유는 COMP 핀을 통해 수행됩니다. COMP 핀은 기본적으로 작은 신호 작동 지점이므로 모든 적층형 장치 간에 이 핀의 신호를 공유하면 고정 주파수 DCS 제어가 일반적으로 10% 이상의 전류 공유 정확도를 달성할 수 있습니다.

위상 인터리빙은 스택에 있는 다음 장치의 모드/동기화 입력 핀에 연결된 전용 SYNC\_OUT 핀을 통해 수행됩니다. SYNC\_OUT은 리플 취소를 제공하기 위해 자동으로 위상 이동하는 것입니다. 이 단순한 데이지 체인을 통해 스택의 모든 장치는 단상 설계에 비해 동일한 주파수에서 작동하며 리플이 더 낮습니다. 많은 수의 컨버터를 적층할 수 있으며 스택에 있는 장치 수를 지정할 필요 없이 매우 좋은 위상 밸런싱을 달성할 수 있습니다.

I2C를 통해 스택과 상호 작용할 경우 출력 전압을 조정하거나, 작동 모드를 변경하거나, 오류 레지스터를 읽으려면 스택의 각 장치가 아닌 기본 장치에만 통신이 이루어집니다. 단일 장치와의 상호 작용은 읽기 및 쓰기 수와 라우팅이 필요한 PCB 신호 수를 줄임으로써 통신 오버헤드와 PCB 라우팅을 크게 간소화합니다.

### 마무리

빠른 과도 응답 및 적층 기능을 갖춘 고정 주파수 DCS 제어는 최신 프로세서의 까다로운 부하 과도 및 출력 전류 요

구 사항에 전력을 공급하며, 고정 주파수 작동 및 동기화로 잡음에 민감한 애플리케이션에 적합합니다. 오토모티브 ADAS 및 인포테인먼트, 광학 모듈, 산업용 테스트 및 측정, 의료, 우주 항공 및 방위 애플리케이션이 모두 이점을 제공합니다. 튜닝 가능한 외부 제어 루프 보상은 최소 출력 커패시턴스로 빠른 과도 응답을 지원하여 전원 공급 시스템의 크기와 비용을 줄입니다.

## 참고 자료

1. 텍사스 인스트루먼트: [PWM/절전 모드를 원활하게 전환하는 고효율 저리플 DCS 제어](#)
2. 텍사스 인스트루먼트: [DCS 제어 토폴로지의 주파수 변화 이해](#)
3. 텍사스 인스트루먼트: [TPS6594133A-Q1 PMIC 및 듀얼 HCP 컨버터를 사용하는 절연 전원 그룹용 Jacinto J7 SoC 제품군 전원 공급](#)
4. 텍사스 인스트루먼트: [MobileyeEyeQ6L – 반개별 파워 트리](#)
5. Priess, Canan. “[ADAS 프로세서에 100A 이상의 전류를 공급하는 방법.](#)” TI E2E™ 설계 지원 포럼 기술 문서, 2023년 6월 6일.

**중요 알림:** 이 문서에 기술된 텍사스 인스트루먼트의 제품과 서비스는 TI의 판매 표준 약관에 의거하여 판매됩니다. TI 제품과 서비스에 대한 최신 정보를 완전히 숙지하신 후 제품을 주문해 주시기 바랍니다. TI는 애플리케이션 지원, 고객의 애플리케이션 또는 제품 설계, 소프트웨어 성능 또는 특허권 침해에 대해 책임을 지지 않습니다. 다른 모든 회사의 제품 또는 서비스에 관한 정보 공개는 TI가 승인, 보증 또는 동의한 것으로 간주되지 않습니다.

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

## 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 © 2024, Texas Instruments Incorporated