참고 자료

Technical White Paper

고전압 DC 전원 공급 방식 AI 서버용 핫 스왑 솔루션

Rakesh Panguloori
Dilip Jain

추상

서버, 네트워크 스위치 및 통신 시스템과 같은 고가용성 시스템은 사용 수명 전반에 걸쳐 다운타임이 거의 제로에 가깝도록 설계되었습니다. 이러한 고가용성 시스템은 전체 시스템의 전원을 끄지 않고 회로 보드를 삽입 또는 제거해야 하는 경우가 많습니다.

트레이 입력에서 전원의 첫 번째 진입점인 핫 스왑 회로는 시스템 진단 및 효율적인 부하 관리를 위한 포괄적인 텔레메트리를 제공합니다. 이 회로의 신뢰성은 작동 업타임에 영향을 미치므로 계획되지 않은 시스템 중단을 방지하기 위해 시스템 트랜지언트를 처리하는 능력이 필수적입니다.

인공지능(AI) 데이터 센터 서버 전력의 기하급수적인 성장에 따라 IT 랙의 배전 전압이 48V_{DC}에서 800V_{DC}로 전환되고 있습니다. 이 백서에서는 800V_{DC} 아키텍처로의 전환을 지원하기 위한 핫 스왑 아키텍처의 진화와, 새롭게 부상하는 시스템 수준 과제와 관련한 중요한 고려 사항에 대해 설명합니다.

목차

1 핫 스왑 아키텍처의 진화.....2
2 차세대 핫 스왑 형성을 결정짓는 고려 사항.....8
3 핫 스왑 FET 구동 방식.....8
4 안전 및 절연.....8
5 결론.....9
6 참고 자료.....9

상표

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

English Document: STDA058
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 핫 스왑 아키텍처의 진화

[1]에 문서화된 바와 같이, 데이터 센터 전원 아키텍처는 AI의 전력 수요를 충족하기 위해 IT 랙 내부의 기존 전원 셸프에서 전원 사이드카로 전환하고 있습니다. 시스템을 종료하지 않고 하드웨어 구성 요소를 교체하거나 추가할 수 있는 기술인 핫 스와핑은 단순한 전용 주변 장치 지원 수준에서 시작하여 최신 데이터 센터 및 컴퓨팅을 위한 핵심 고성능 기능으로 진화했습니다. 이 기술의 발전은 단순한 커넥터 표준에서 고도화된 전력 관리에 이르기까지 폭넓게 이루어졌으며, 이는 극대화된 업타임과 효율성에 대한 필요성에 의해 추진되었습니다.

초기 시대(USB 이전)

초기에 핫 스와핑은 메인프레임 컴퓨터와 같은 고가용성 시스템으로 제한되었으며, 고가의 전용 하드웨어를 통해 시스템 종료 없이 모듈을 제거할 수 있었습니다. 소형 컴퓨터 시스템 인터페이스(SCSI)는 주변 장치에 대한 핫 스와핑을 도입했으나, 오늘날의 표준만큼 신뢰할 수는 없었습니다.

USB 혁명

USB의 도입은 가전제품 분야에서 핫 스와핑을 일반화하였으며, 시스템이 작동하는 동안 키보드, 마우스, 프린터, 카메라 및 플래시 드라이브를 안전하게 추가하고 제거할 수 있게 해주었습니다. 진화는 단순히 슬롯(패시브)의 전원을 끄는 것에서 파워 온 시퀀스를 안전하게 관리하는 액티브 MOSFET 컨트롤러를 사용하여 부품과 백플레인을 모두 보호하는 것으로 옮겨갔습니다.

데이터 센터 성장(12V 시대)

데이터 센터 다운타임의 비용이 너무 많이 들면서 고가용성을 달성하기 위해 핫 스와핑 기능이 필수적으로 바뀌었습니다. 핫 스왑 컨트롤러는 12V 백플레인에 서버 블레이드를 라이브 삽입하는 동안 돌입 전류를 관리하고 주 버스를 보호하는 데 도움이 되었습니다.

그림 1-1에 나와 있는 1세대 핫 스왑 컨트롤러는 간단한 전력 제한 아키텍처를 사용하여 시동 및 오류 복구 중에 MOSFET가 안전 작동 영역(SOA) 내에 유지되도록 했습니다. 컨트롤러는 전류 정보를 얻기 위해 감지 저항의 전압을 모니터링하는 전류 감지 증폭기와 FET 양단의 전압을 측정하기 위한 전압 감지 회로로 구성되어 있습니다.

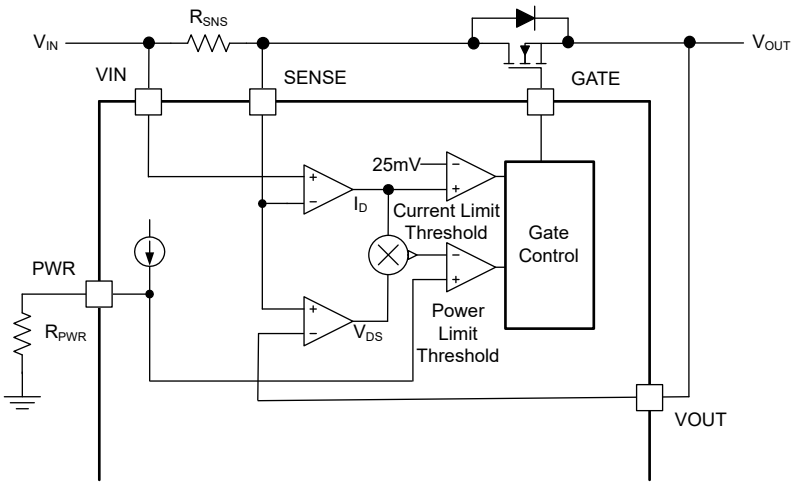


그림 1-1. 전력 제한 핫 스왑 아키텍처

전류 감지 증폭기와 전압 감지 회로의 출력을 곱하면 FET의 전력 손실이 제공되며, 시스템의 돌입 전류 또는 오류 전류를 관리하면서 핫 스왑 FET를 보호하기 위해 제한해야 합니다.

그림 1-1에 나와 있는 2세대 핫 스왑 컨트롤러는 과열 보호, 시스템 진단에 사용할 텔레메트리, 랙 서버의 트레이 간 데이터 트래픽 관리 등 보다 정교한 기능을 제공합니다. 그러나 랙 트레이의 전력 레벨이 높아지면 출력 커패시턴스도 증가합니다. 따라서 상업용 FET가 처리할 수 없는 시동 중 심각한 SOA 스트레스를 감안할 때 전력 제한 방식의 컨트롤러를 사용한 설계는 비현실적입니다. 대체 접근 방식[2]은 그림 1-1에 나와 있는 출력 전압 회전율(dv/dt) 제어 회로로 돌입 전류를 제한하여 시동 시 전력 손실을 줄이고 FET가 전력을 안전하게 처리할 수 있도록 더 오랜 기간 동안 손실을 분산시키는 것입니다.

English Document: STDA058
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

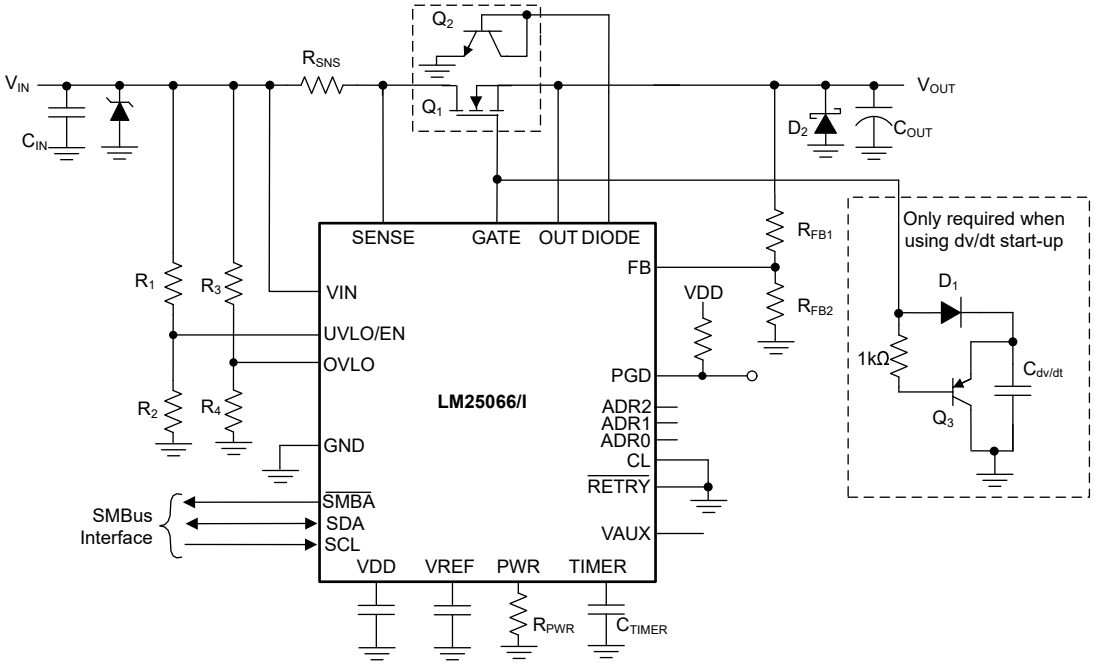


그림 1-2. 12V 레일을 위한 출력 dv/dt 제어를 지원하는 핫 스왑 솔루션

데이터 센터 운영자들은 과중한 데이터 트래픽을 지원하고 데이터 처리 능력을 향상시키기 위해 더 빠르고 전력 소비가 많은 CPU와 메모리를 채택했습니다. 이로 인해 동일한 폼 팩터에서 트레이당 4kW에 달하는 전력 요구 사항이 발생했으므로, 그림 1-3에서 보듯이 FET가 통합된 고밀도 보호 솔루션(eFuse라고도 함)이 요구되었습니다. TI의 12V 고전류 eFuse는 다운스트림 컴퓨팅 부하의 트랜지언트 수요를 지원하기 위한 조정 가능한 과전류 블랭킹, 블랙박스 오류 기록, 능동 동기화, 그리고 무제한 확장성을 위한 시동 및 정상 상태에서의 부하 공유와 같은 차별화된 기능[3]을 제공하며, 모두 4.5mm x 5mm 풋프린트에서 60A의 RMS(제곱평균제곱근) 전류를 지원합니다.

English Document: STDA058
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

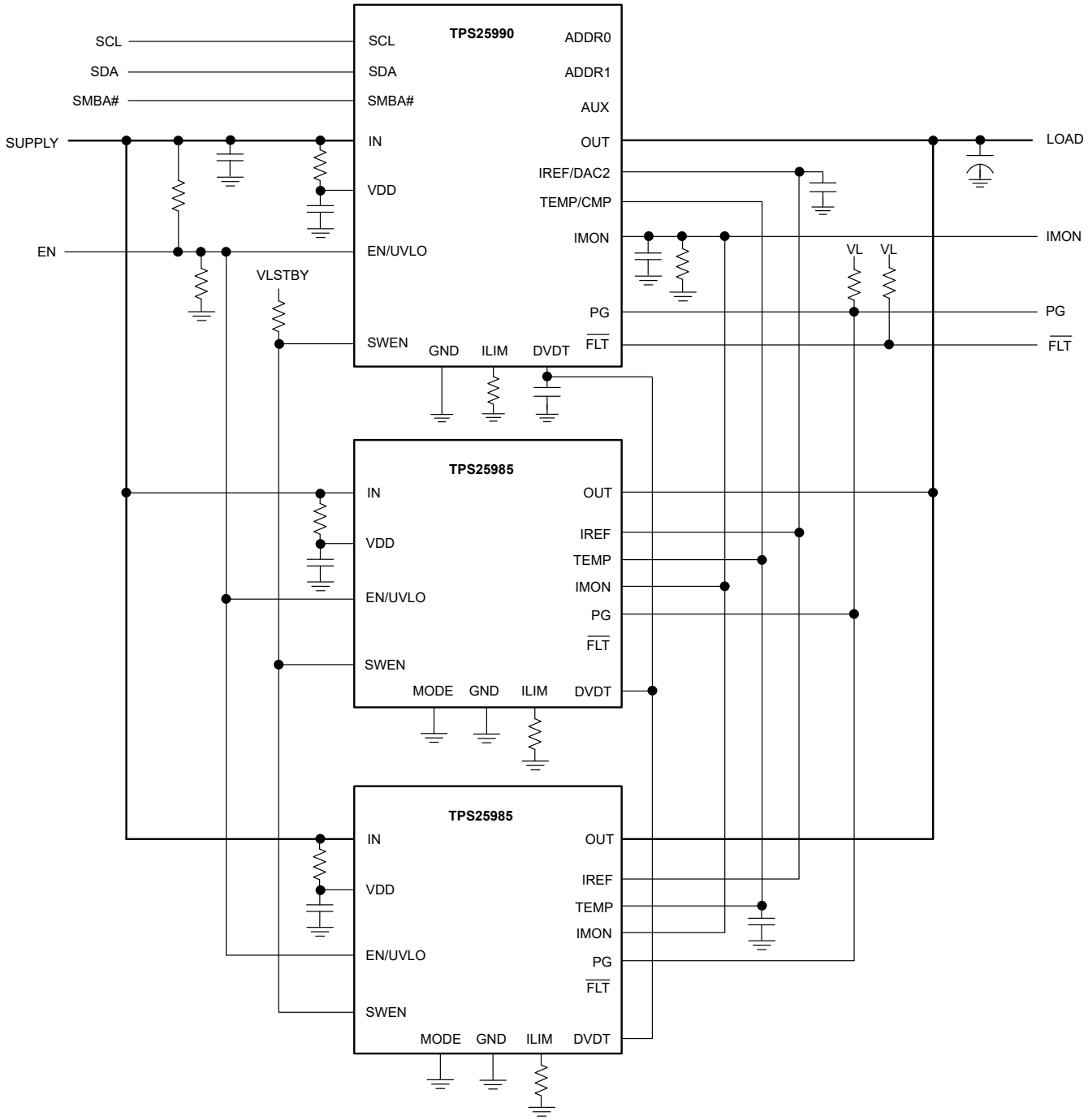


그림 1-3. 12V 레일을 위한 병렬 확장형 고전류 eFuse 솔루션

클라우드 컴퓨팅(48V 시대)

클라우드 컴퓨팅 애플리케이션의 수요가 증가함에 따라, 엔터프라이즈 서버는 대량의 데이터와 스토리지를 동시에 처리하므로 전력 집약적으로 변했습니다. 각 서버 마더보드의 정상 상태 전력 정격은 이제 5kW~6kW로, 12V 레일에서의 전력 분배는 비효율적입니다. 12V에서 48V 서버 아키텍처로 전환하면 동일한 전력에 대해 전류를 75% 줄일 수 있습니다. 이러한 감소는 저항 전력 손실(I^2R)을 1/16로 줄이고, 구리 버스 바 및 케이블 요구 사항을 최대 90% 축소하며, 랙 방열을 크게 낮춥니다.

그래픽 처리 장치(GPU)는 48V 서버 시스템에서 주된 부하를 형성하며, 과도 부하의 부하 진폭, 회전율 및 주파수가 일반 서버에 비해 3~4배 더 높습니다. TI의 1세대 LM5066I 핫 스왑 컨트롤러를 사용하여 고전력 48V 설계를 지원할 때는 [4]에서 설명한 것과 같은 몇 가지 회로 개선이 필요합니다.

English Document: STDA058
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

TI의 차세대 핫 스왑 컨트롤러인 LM5066H2는 시동 및 오류 상태 동안 단일 SOA FET가 전력 스트레스를 처리할 수 있도록 하는 듀얼 게이트 드라이브 아키텍처(그림 1-4)를 제공합니다. 정상 부하 전류 작동을 위한 여러 개의 낮은 드레인-소스 온 저항($R_{DS(ON)}$) FET와 결합된 LM5066H2는 4kW 초과 설계에서 전체 솔루션 크기를 40% 줄이는 데 도움이 됩니다.

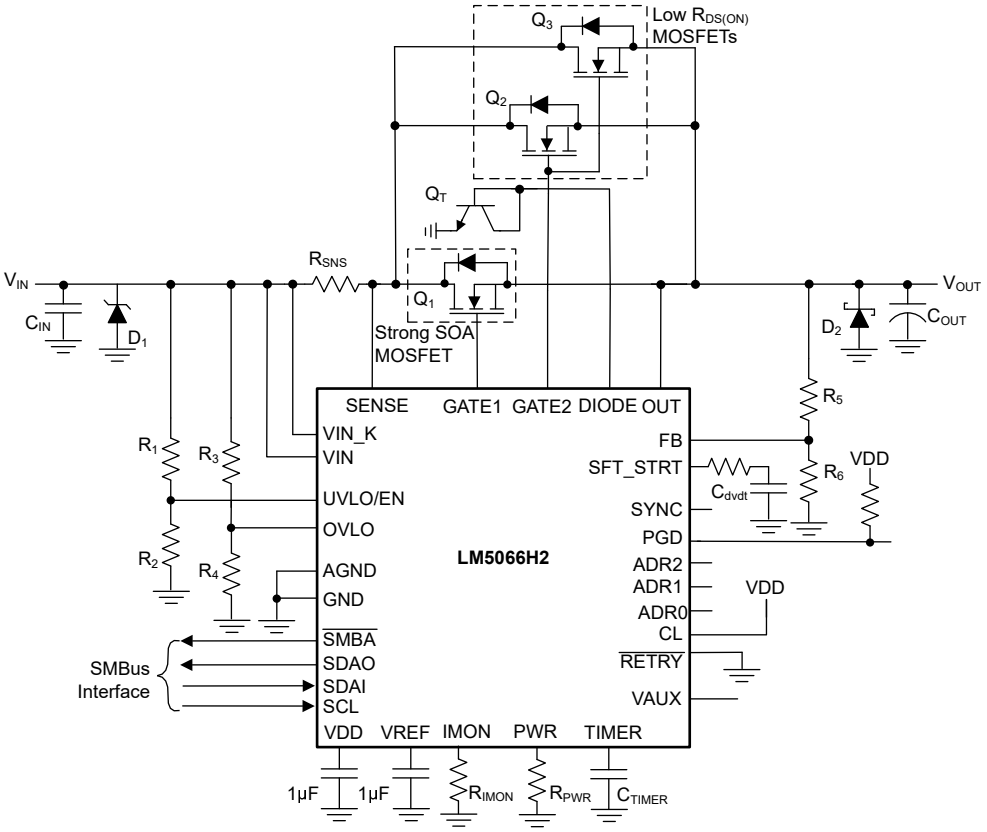


그림 1-4. 48V 랙 서버 전력 분배용 핫 스왑 솔루션.

업계 최초의 48V eFuse인 TI의 TPS1685는 향상된 FET 보호 및 용이한 확장성을 인에이블하여 고밀도 고전력 설계를 실현합니다. 그림 1-5에서는 48V eFuse를 사용한 회로 구성을 보여줍니다.

English Document: STDA058
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

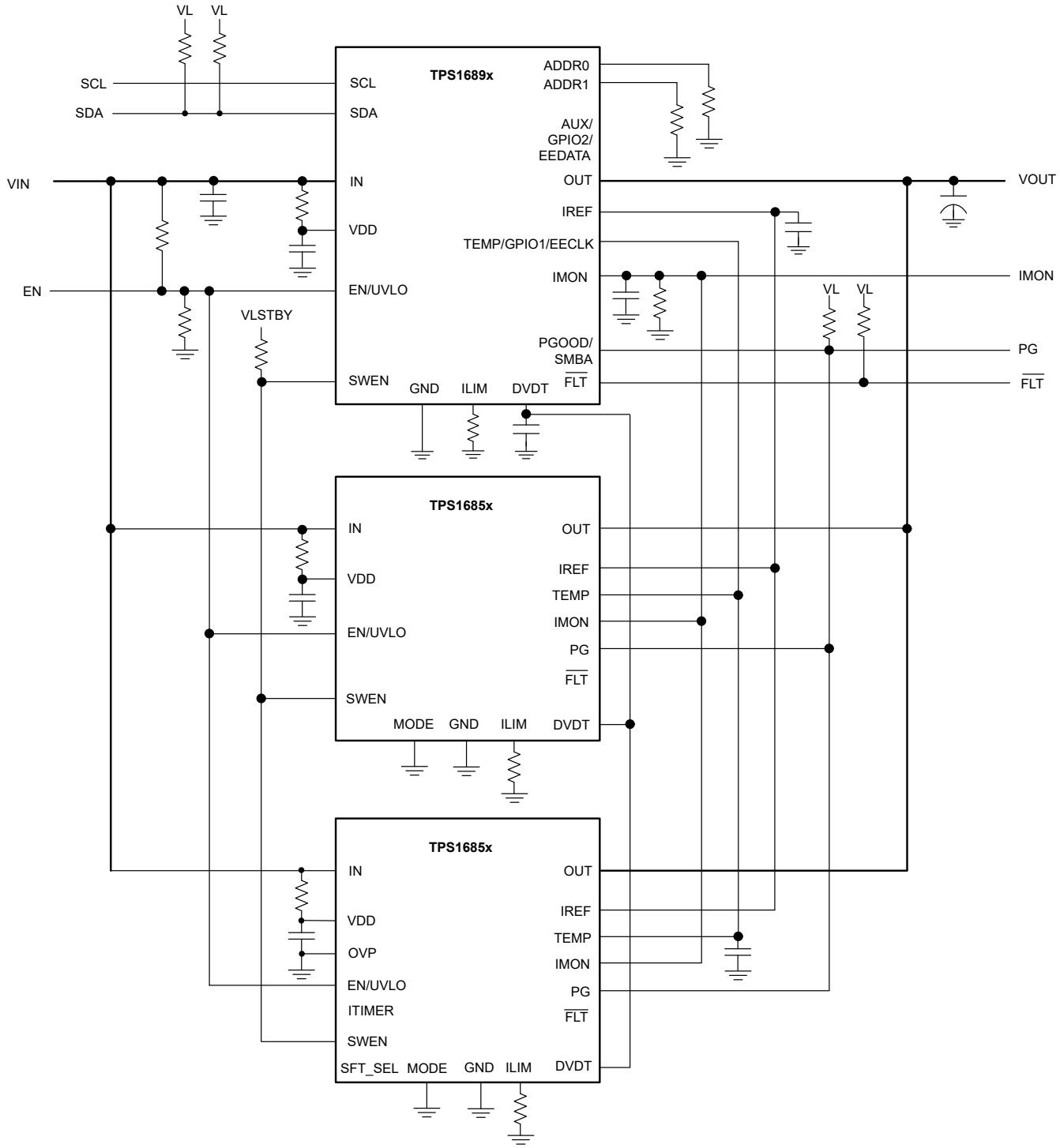


그림 1-5. 48V 레일을 위한 병렬 확장형 고전류 eFuse 솔루션.

AI 컴퓨팅(±400V_{DC} 또는 800V_{DC} 시대)

AI 연산 능력의 급증으로 인해 전력 손실을 줄이고 효율성을 향상시키고자 서버 랙에서 12V에서 48V 아키텍처로의 전환이 촉진되었습니다. AI 기반 IT 랙은 수백 개의 프로세서를 사용하여 AI가 가장 잘 작동하는 데 필요한 계산 볼륨을 신속하게 처리하므로, 가까운 미래에 100kW~1MW 범위의 랙 전력을 요구합니다[5]. 48V 레일에 이 양의 전력을 분배하면 20kA를 초과하는 전류가 발생하므로 구현이 비현실적인 무겁고 값비싼 버스 바가 필요하게 되어, AI IT 서버 랙의 전력 분배를 위해 더 높은 ±400V_{DC} 또는 800V_{DC} 버스 전압이 필요하게 됩니다. 저전압 DC 아키텍처는 적절한 안전 및 절연 조치를 취하면서 더 높은 전압의 돌입 전류를 처리하고 정확한 텔레메트리를 제공하기 위해 고도화된 핫 스왑 컨트롤러를 필요로 합니다.

English Document: STDA058
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

주요 하이퍼스케일러와 클라우드 서비스 공급업체들은 현재 ±400V_{DC}(2선식), ±400V_{DC}(3선식) 및 800V_{DC}와 같은 여러 시설 수준 아키텍처를 평가하고 있습니다. 이러한 아키텍처는 핫 스왑 보호 요구 사항에 직접적인 영향을 미칩니다.

그림 1-6, 그림 1-7, 그림 1-8 및 그림 1-9 는 IT 랙 측 핫 스왑 보호 소켓과 함께 다양한 아키텍처[6]를 보여줍니다.

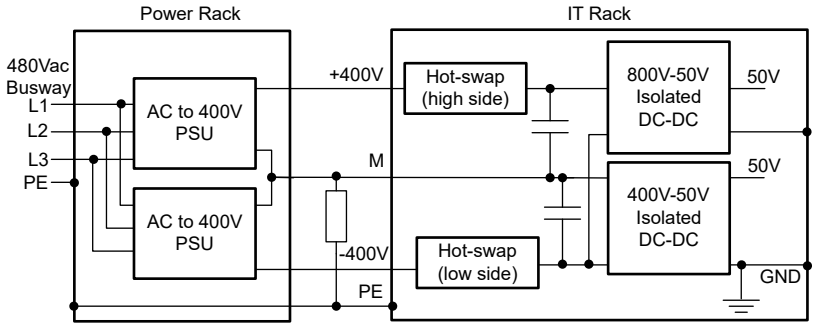


그림 1-6. 3선식 ±400V_{DC} 전력 분배 시스템

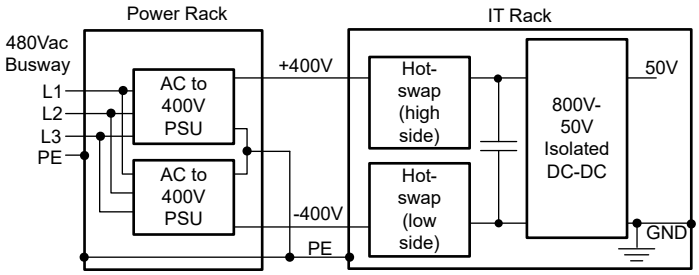


그림 1-7. 2선식 ±400V_{DC} 전력 분배 시스템

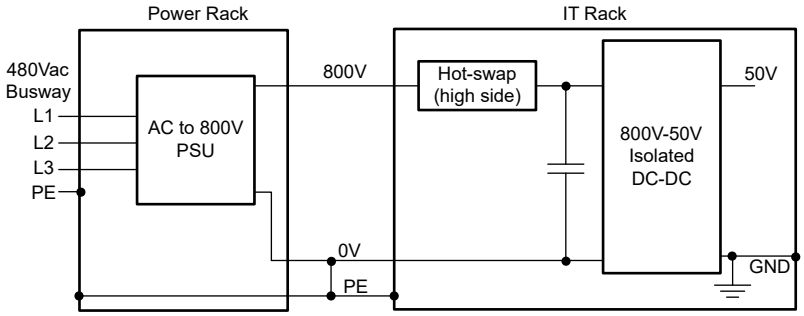


그림 1-8. 2선식 800V_{DC} 전력 분배 시스템

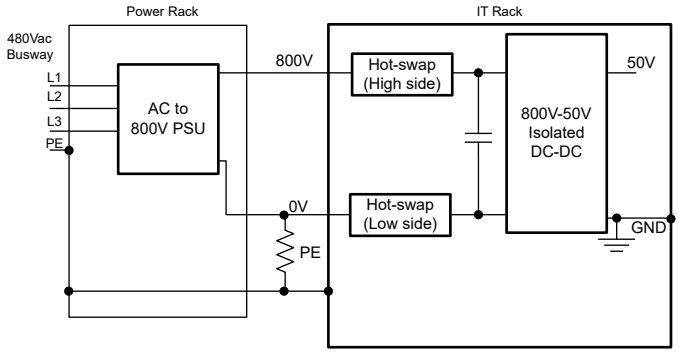


그림 1-9. 고저항 접지 방식의 보호 접지가 적용된 2선식 800V_{DC} 전력 분배 시스템

English Document: STDA058
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 차세대 핫 스왑 형성을 결정짓는 고려 사항

AI 모델과 과학 시뮬레이션이 복잡해짐에 따라 단일 프로세서만으로는 충분하지 않은 경우가 많습니다. IT 트레이는 여러 개의 고전력 CPU 및 GPU를 수용해야 합니다. 이는 랙에서 가장 높은 가치의 공간이므로, 핫 스왑 회로 및 중간 버스 컨버터를 수용할 수 있는 가용 공간의 제한으로 인해 소형 800V 핫 스왑 솔루션이 요구됩니다. 디스크리트 구현[7]은 절연 게이트 드라이버, 전류 및 전압 감지 증폭기, 디지털 아이솔레이터, 다중 권선 보조 전원 공급 장치 및 마이크로컨트롤러로 구성됩니다.

TI의 800V LMI800PS 핫 스왑 컨트롤러에는 통합 전력 및 신호 절연 기능과 함께 기존의 모든 핫 스왑 컨트롤러 요소가 있어 더 높은 전력 밀도의 핫 스왑 솔루션을 구현할 수 있습니다.

그림 2-1에서는 ±400V_{DC} 2선식 시스템 아키텍처용 LMI800PS 기반 핫 스왑 솔루션을 보여줍니다.

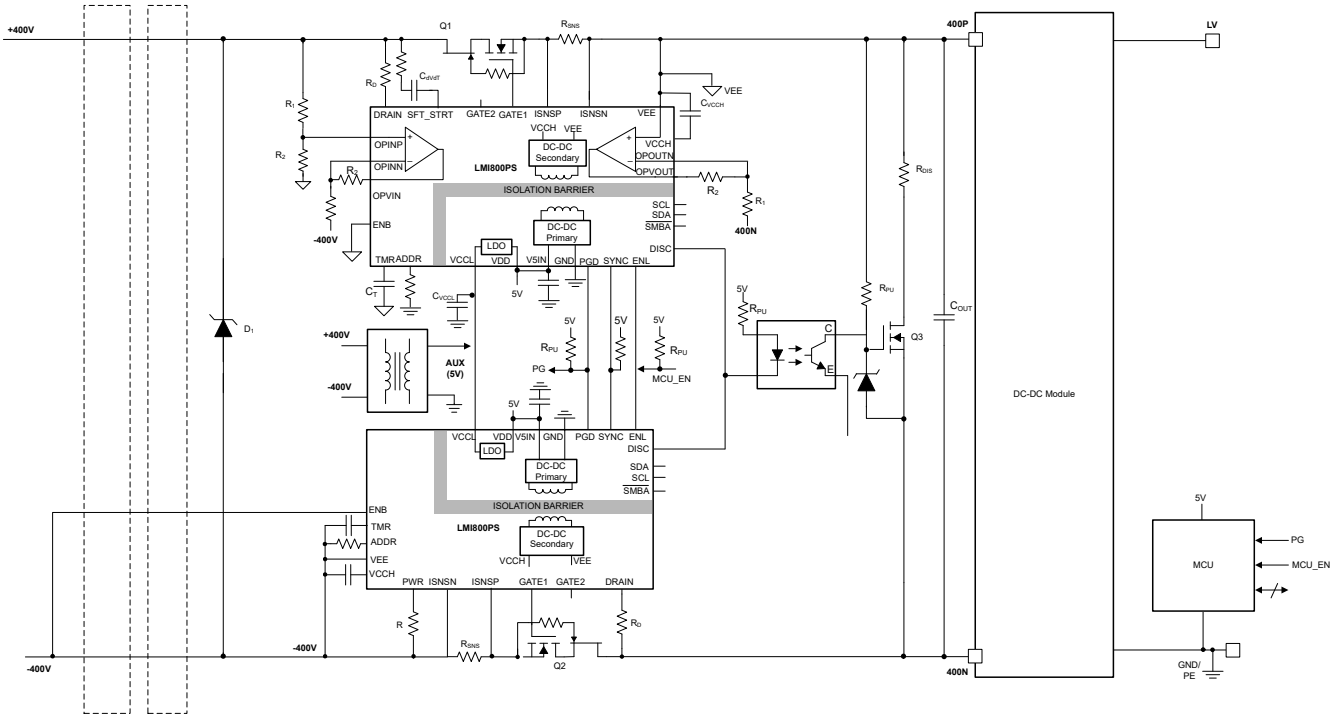


그림 2-1. LMI800PS 핫 스왑 솔루션

범용 절연 핫 스왑 컨트롤러 아키텍처

그림 1-6, 그림 1-7, 그림 1-8 및 그림 1-9에서 보듯이, 핫 스왑 회로는 시스템 아키텍처와 접지 체계에 따라 입력 공급 레일의 하이 사이드 및 로우 사이드 모두에 존재할 수 있습니다. LMI800PS 컨트롤러는 로컬 칩 GND를 플로팅하고 절연 장벽 너머로 필요한 신호 및 바이어스 전력을 공급하여 두 레일 모두에서 사용할 수 있도록 합니다.

3 핫 스왑 FET 구동 방식

800V_{DC} 시스템의 경우, 전력 FET의 주요 선택은 1.2kV 드레인-소스 전압(V_{DS}) 정격 실리콘 카바이드(SiC) 또는 SiC 캐스코드 JFET입니다. SiC FET에는 온 저항을 최소화할 수 있도록 FET를 완전히 턴온하기 위해 18V 게이트 드라이브가 필요하며, SiC 캐스코드 JFET에는 12V 게이트 드라이브가 필요합니다. 핫 스왑 애플리케이션에서 FET는 일반적으로 돌입 전류 제한 단계 동안 선형 모드로 작동합니다. 돌입 단계 동안 SOA 스트레스를 FET의 SOA 제한 내에서 유지하도록 핫 스왑 회로를 적절하게 설계하는 것이 중요합니다. 출력 단락 상태로의 전원 투입과 같은 오류 시나리오에서 FET를 보호하려면 보호 체계도 필요합니다. 과부하 보호는 스위치를 활성 모드에 둘 수 없는데, 이는 빠른 과열로 이어지기 때문입니다.

LMI800PS의 구성 가능한 게이트 구동 기능, 최저 200W까지 설정할 수 있는 전력 제한 임계값 및 구성 가능한 타이머는 시스템 설계자가 신뢰할 수 있는 핫 스왑 솔루션을 유연하게 개발할 수 있도록 지원합니다.

4 안전 및 절연

고전압 섹션으로부터 제어 및 표시 신호(관리 신호)를 절연하고 시스템이 핫 스왑 컨트롤러와 통신하도록 하는 것이 중요합니다. 이러한 신호에 대한 절연은 오염도 2, 10%~90% 습도 비응축(안전 표준 국제 전기 기술 위원회[IEC] 62368-1에 따름)에 대한 강화 절연 및 최대 고도 3,050m(5,000m 권장)의 간극 및 연면 거리를 준수해야 합니다.

English Document: STDA058
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

고전압 및 저전압 영역 사이의 ≥8mm 연면 거리와 5kVrms 절연 내전압(V_{ISO}) 정격 및 10kV의 서지 기능을 갖춘 LMI800PS 장치 패키지는 전체 안전 요구 사항을 충족합니다.

이러한 안전 요구 사항 중 하나는 IT 트레이가 랙에서 분리되거나 출력이 분리될 때 출력 벌크 커패시터를 2초 이내에 <120V로 방전하는 것입니다. 직렬 방전 저항이 있는 FET를 출력 커패시터와 병렬로 배치하면 이 기능을 인에이블할 수 있습니다. LMI800PS는 방전 FET 제어 출력 신호를 특징으로 하여 출력 방전 설계를 간소화합니다.

5 결론

AI 연산 능력의 급증으로 인해 고성능 AI 프로세서의 증가하는 전력 요구 사항을 수용하고 높은 연산 밀도를 지원하고자 AI 서버 랙의 $800V_{DC}$ 전력 전달 방식으로의 핵심적인 전환이 이루어졌습니다. 이러한 전환은 특히 핫 스왑 이벤트 동안 시스템 보호 및 모니터링을 위한 새로운 과제를 유발합니다.

TI는 돌입 전류를 효과적으로 관리하고, 시스템 진단 및 안전을 위한 포괄적인 텔레메트리를 제공하며, 신뢰할 수 있는 작동을 유지하는 LMI800PS 고전압 핫 스왑 컨트롤러로 기술 개발을 선도하고 있습니다.

6 참고 자료

1. *Diablo 400 프로젝트: 랙 및 전원*(버전 0.5.2). (2025년 5월 30일). Open Compute Project: 텍사스주 오스틴.
2. Huntington, J., 및 Tu, M. (연도 미상). *차세대 AI 인프라를 위한 800V DC 아키텍처*. NVIDIA 백서. 2026년 9월 28일 액세스함.
3. McDonald, B. (2025년 11월). *AI의 대규모 전력 요구 사항을 충족하기 위해 발전하고 있는 데이터 센터*(문헌 번호 SSZTDB4). 텍사스 인스트루먼트 기술 문서.
4. Pal, A., 및 Panguloori, R. (2026년 3월). *800V 또는 ±400V DC 전력 분배의 강력한 보호 구현을 위한 부동 접지 핫 스왑 아키텍처*(문헌 번호 STDA029). 텍사스 인스트루먼트.
5. Pal, A., 및 Panguloori, R. (2025년 2분기). *핫 스왑 컨트롤러를 사용한 48V AI 서버의 보호 과제 해결*(문헌 번호 SLYT863). 텍사스 인스트루먼트 아날로그 디자인 학술지.
6. Pal, A., 및 Sagar, S. (2025년 1월). *TI 스마트 eFuse의 고도화된 기능을 활용한 서버 전원 설계 향상*(문헌 번호 SLVAFR8). 텍사스 인스트루먼트.
7. Rogachev, A. (2014년 11월). *견고한 핫 스왑 설계*(문헌 번호 SLVA673 개정판 A). 텍사스 인스트루먼트.

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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 비침해에 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 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 TI의 판매 약관 , TI의 일반 품질 지침또는 ti.com 이나 해당 TI 제품과 함께 제공되는 기타 조건의 적용을 받습니다. TI가 이러한 리소스를 제공한다고 해서 TI 제품에 대한 TI의 해당 보증 또는 보증 부인 정보가 확장 또는 기타의 방법으로 변경되지 않습니다. TI가 명시적으로 제품을 사용자 정의 또는 고객 정의용으로 지정하지 않는 한, TI 제품은 범용의 표준 카탈로그 장치입니다.

TI는 사용자가 제안할 수 있는 어떠한 추가적이거나 상이한 조건도 반대하며 이를 거부합니다.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

최종 업데이트: 2025/10/25

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), 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 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, TI’s General Quality Guidelines, or other applicable terms available either on 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. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

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

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025