

## Technical Article

## LLC 시리즈 공진 컨버터 상자를 벗어나 생각하기



Sheng-Yang Yu

전원공급산업은 10년 넘게 그림 1에서 보드시피 저비용, 고효율 절연 전력계인 공진 인덕터 2개("Ls" 2개:  $L_m$ 과  $L_r$ )와 공진 커패시터 1개("C" 1개:  $C_r$ )가 있는 LLC(인덕터-인덕터-커패시터) 직렬 공진 컨버터(LLC-SRC)를 널리 적용해 왔습니다. LLC-SRC는 복잡한 제어 체계 없는 소프트 스위칭 특성을 가지고 있다. 소프트 스위칭 기능을 사용하면 낮은 정격 전압을 사용하는 부품을 사용할 수 있으며 높은 컨버터 효율을 얻을 수 있습니다. 50% 듀티 사이클이 고정된 가변 주파수 변조인 간단한 제어 체계는 위상 전환 풀 브리지 컨버터와 같은 다른 소프트 스위칭 토폴로지에 사용되는 컨트롤러에 비해 컨트롤러 비용이 상대적으로 낮습니다.

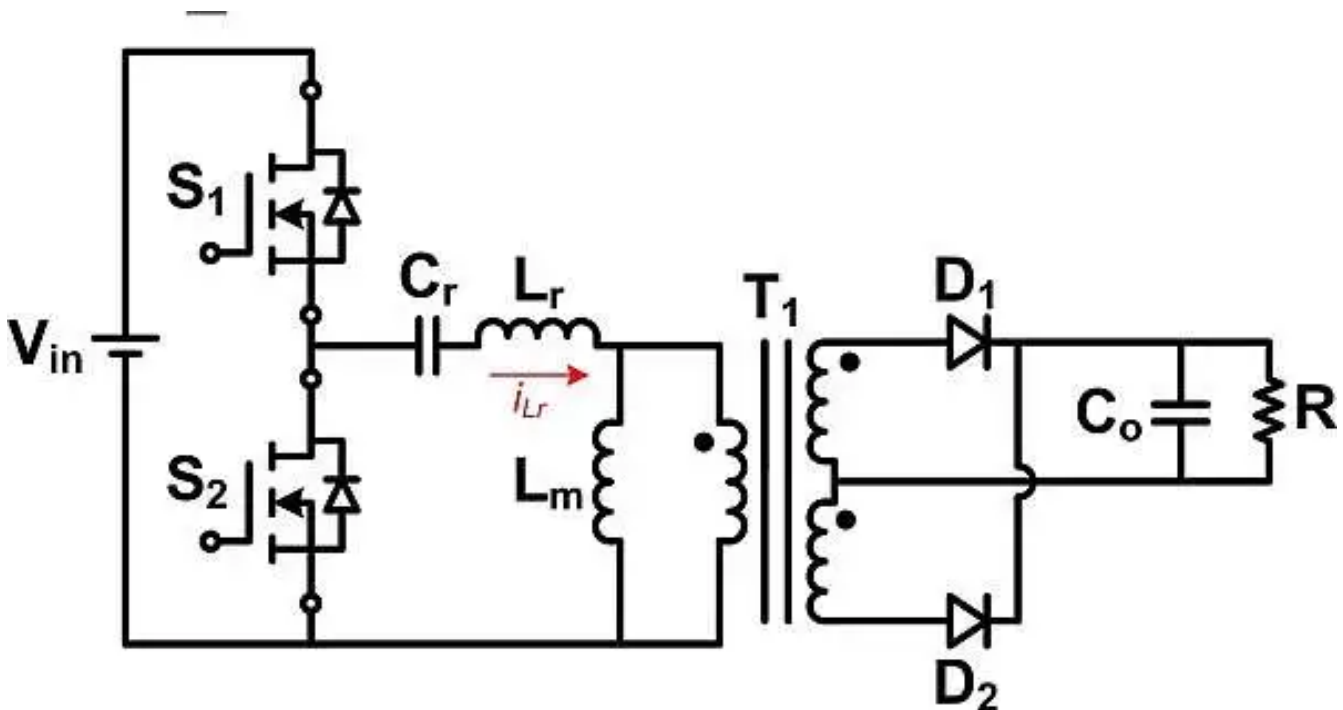


그림 1. LLC-SRC

LLC-SRC는 하드 스위칭 플라이백 및 순방향 컨버터보다 훨씬 높은 효율성을 달성할 수 있지만, 최고의 효율성을 달성하려면 몇 가지 설계 과제가 있습니다. 첫째, 충분히 넓은 제어 가능한 범위를 허용하려면 LLC-SRC 설계에서 두 공진 인덕터  $L_m$ - $L_r$ 의 비율이 10보다 작아야 합니다. 동시에  $L_m$ 에서 큰 인덕턴스가 필요합니다. 순환 전류를 낮추려면 공진 인덕터 비율을 낮게 유지하기 위해서는  $L_r$  인덕턴스를 크게 유지해야 합니다.

흥미로운 점은 직렬 공진 인덕터  $L_r$ 의 전류는 DC 콘텐츠가 전혀 없는 완전 AC이고, 이는 높은 자속 밀도 변화( $\Delta B$ 는 높음)를 의미합니다.  $\Delta B$ 가 높다는 것은 AC 관련 인덕터 손실이 크다는 것을 의미합니다. 인덕터가 페라이트 기반 코어에 감겨지면 코어의 공기 갭 근처에 있는 기생 효과로 인한 높은 권선 손실이 발생할 수 있습니다.

$L_r$ 의 인덕턴스가 크면 인덕터가 더 많이 회전되고 AC 권선 손실이 늘어납니다. 그것이 바로 많은 LLC-SRC 설계에서 권선 손실과 코어 손실 간의 절충으로 공진 인덕터에 분할 철 기반 코어를 적용하는 이유입니다. 그럼에도 불구하고 높은  $\Delta B$ 는 공진 인덕터에서 높은 권선 손실 또는 높은 코어 손실 등 상당한 손실을 발생시킵니다.

LLC-SRC 설계의 두 번째 과제는 어떻게 하면 동기 정류기(SR) 제어를 가장 잘 최적화할 수 있는가 하는 것입니다. LLC-SRC 정류기 전류 전도 타이밍은 부하 조건 및 스위칭 주파수에 따라 결정됩니다. LLC-SRC SR 제어에서 가장 유망한 방법은 SR 전계 효과 트랜지스터(FET) 드레인-소스 전압( $V_{DS}$ )을 감지한 다음  $V_{DS}$ 가 특정 수준 이하일 때 SR을 켜고 끄는 것입

니다.  $V_{DS}$  감지 방법은 밀리볼트 수준의 정확도를 요구하며, 따라서 집적 회로에서만 구현할 수 있습니다. 자체 구동 또는 기타 저비용 SR 제어 체계는 전류 공급 커패시터 부하 출력 구성 때문에 LLC-SRC에는 적용할 수 없습니다. 따라서 LLC-SRC SR 컨트롤러 회로의 비용은 일반적으로 다른 토폴로지보다 높습니다.

높은 인덕터 손실과 SR 제어와 같은 두 가지 문제를 해결하면서 공진 컨버터가 제공할 수 있는 대부분의 이점을 활용하려면 **그림 2**에 나와 있는 변형된 CLL 다중 공진 컨버터(CLL-MRC)를 사용하는 것을 고려해 보십시오.

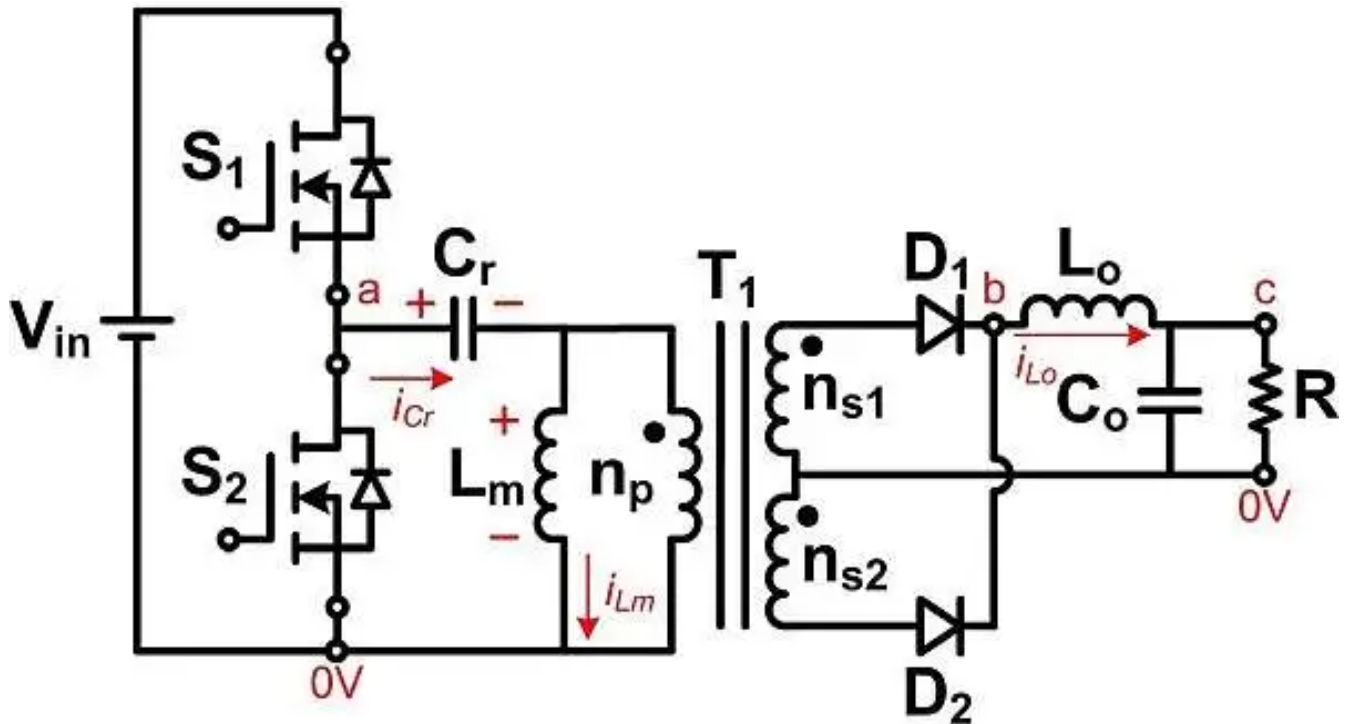


그림 2. 변형된 CLL-MRC

3개의 공진 요소(1개의 커패시터 및 2개의 인덕터)가 입력 측에 있는 CLL-MRC와 달리, 변형된 CLL-MRC는 **그림 2**에 나와 있는 것처럼 1개의 인덕터를 입력 측에서 출력 측으로 이동하고 정류기 -  $L_o$  뒤에 배치합니다. 이러한 변경을 통해 공진 인덕터에서 DC 전류 콘텐츠가 허용되는데, 이는  $\Delta B$  이 낮고 자기 손실이 적을 수 있음을 의미합니다.

**그림 3**은(는) 변경된 CLL-MRC의 작동을 보여줍니다. 여기서  $f_{sw}$ 는 컨버터 스위칭 주파수이고  $f_{r1} = \{2\pi [C_r(L_{r1}/L_{r2})]^{0.5}\}^{-1}$ 은 두 가지 공진 주파수 중 하나입니다.  $f_{sw}$ 가  $f_{r1}$ 보다 낮으면 LLC-SRC의 출력 권선 전류와 마찬가지로 스위칭 기간이 끝나기 전에 출력 권선 전류가 0으로 떨어집니다. 이제 출력에 인덕터가 있습니다. 간단한 커패시터 및 저항 세트는 출력 인덕터 전압을 감지할 수 있습니다. 큰 전압 변화( $dV/dt$ )가 발생할 때마다 SR을 켜거나 끄는 타이밍입니다. 따라서 SR 제어 체계는  $V_{DS}$  감지 체계보다 비용이 낮습니다.

$f_{sw}$ 가  $f_{r1}$ 보다 높으면 출력 인덕터 전류는 연속 전도 모드로 작동합니다. 다시 말해,  $\Delta B$  가 작아지고 인덕터 AC 손실은 훨씬 작을 수 있으며, 컨버터 효율이 LLC-SRC보다 훨씬 높을 수 있습니다.

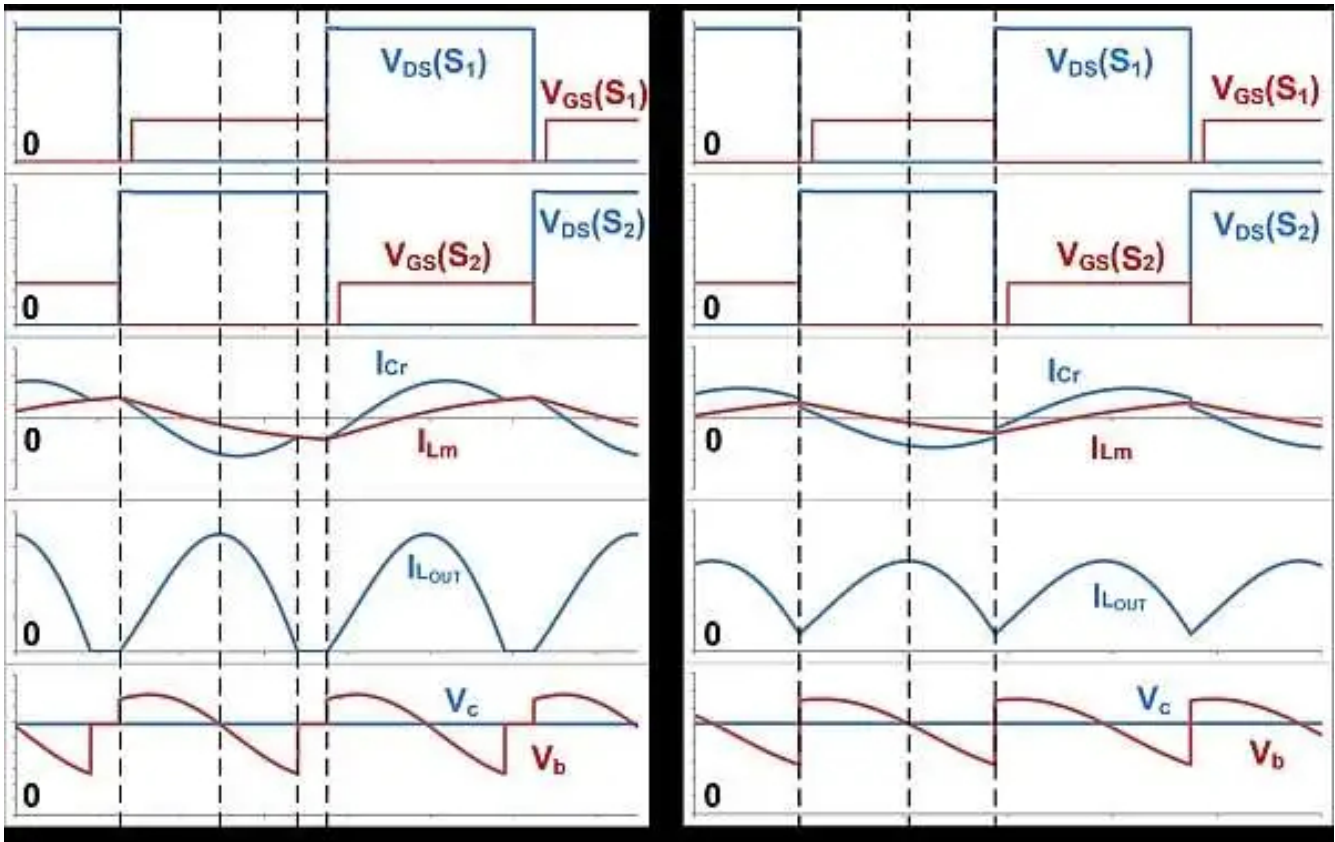


그림 3. 변형된 CLL-MRC 키파형:  $f_{sw} < f_{r1}$ (좌),  $f_{sw} > f_{r1}$ (우)

이러한 성능 가정을 확인하기 위해 정확히 동일한 구성 요소와 매개 변수를 사용하여 LLC-SRC 및 수정된 CLL-MRC 전력계를 구축했습니다. 유일한 차이점은  $72\mu\text{H}$  인덕터를 LLC-SRC 공진 인덕터와  $1\mu\text{H}$  인덕터를 수정된 CLL-MRC 출력 인덕터로 적용하는 것입니다.

그림 4은(는) 두 전력계의 효율성 측정치를 보여줍니다. 낮은 입력 전압의 경우  $f_{sw}$ 가  $f_{r1}$ 보다 작기 때문에 변형된 CLL-MRC의  $L_o$  전류는 여전히 큰  $\Delta B$ 를 사용하는 불연속 전도 모드 상태입니다. 따라서 이 작동 조건에서는 변형된 CLL-MRC에 효율성 이점이 없습니다.

입력 전압이 높아지면  $f_{sw}$ 가  $f_{r1}$ 보다 높고  $L_o$  전류는 연속 전도 모드가 됩니다.  $430\text{V}$  입력의 경우 변형된 CLL-MRC의 효율성은 LLC-SRC보다 1% 더 높습니다. 이 비교를 통해 변형된 CLL-MRC를 항상  $f_{r1}$ 보다 높은 주파수에서 작동하도록 설계하면 전체 범위에 걸쳐 LLC-SRC보다 효율성 성능이 우수할 수 있다는 것을 알 수 있습니다.

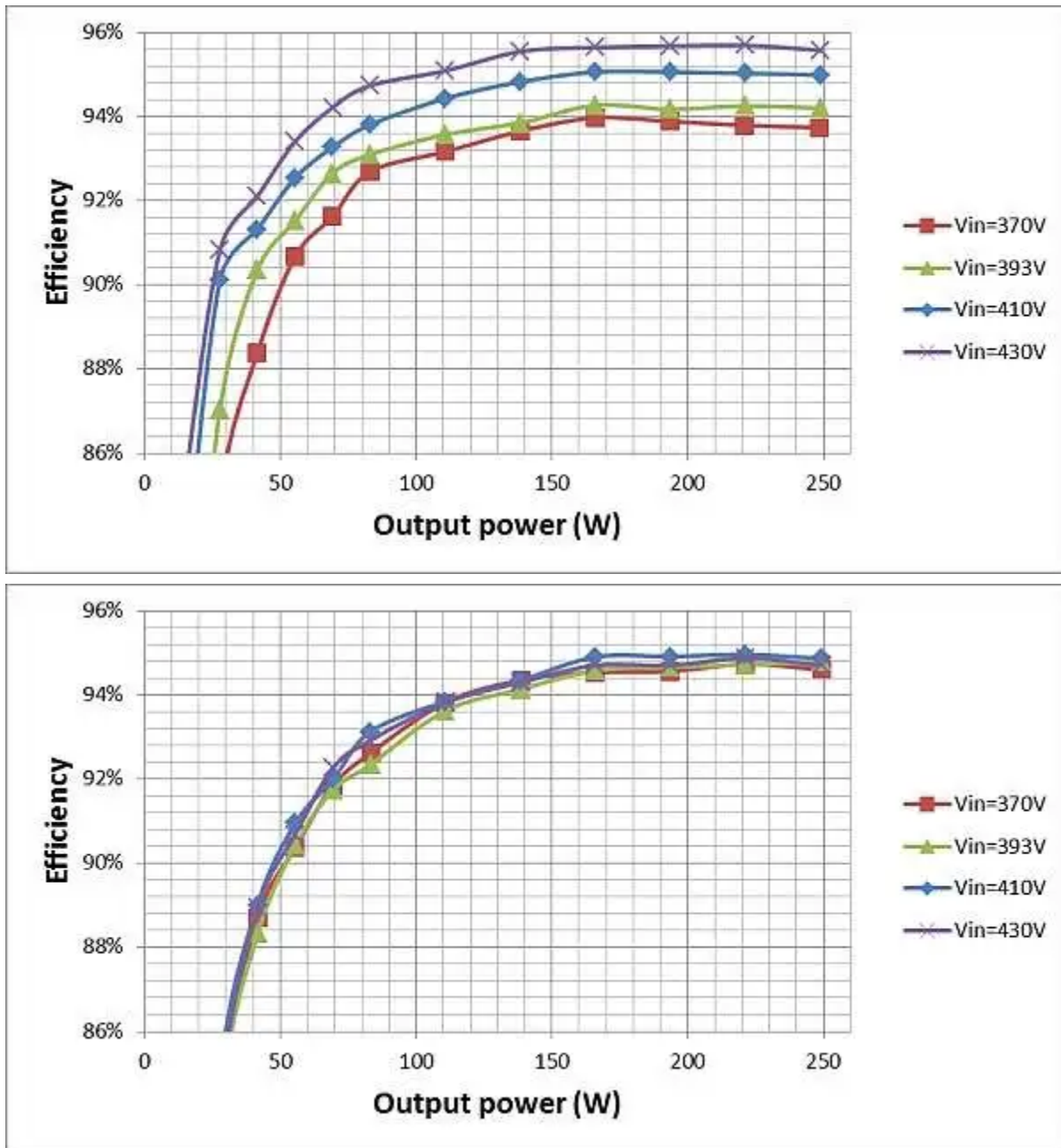


그림 4. 다양한 입력 전압 레벨에서 컨버터 효율: 변형된(위) CLL-MRC, LLC-SRC(아래)

LLC-SRC는 실제로 좋은 토폴로지이며 많은 매력적인 특징을 갖고 있습니다. 하지만 애플리케이션에 따라서는 이 것이 최적의 솔루션이 아닐 수도 있습니다. 때로는 낮은 회로 비용으로 더 높은 효율을 달성하려면 획기적인 접근법이 필요할 수 있습니다.

#### 추가 리소스

- 텍사스 인스트루먼트 전원 공급 장치 설계 세미나의 다음 논문을 읽어보세요.
  - “Designing an LLC Resonant Half-Bridge Power Converter(LLC 공진 하프 브리지 전원 컨버터 설계).”
  - “Survey of Resonant Converter Topologies(공진 컨버터 토폴로지 설문 조사).”
  - “Control and Design Challenges of Synchronous Rectifiers(동기식 정류기 제어 및 설계 문제).”
- 400VDC 입력 28V/9A 출력 소형, 고효율 CLL 공진 컨버터 레퍼런스 디자인을 확인해 보세요.

## 관련 문서

- LLC 공진 토폴로지는 스위칭 손실을 줄이고 효율성을 높입니다
- 디지털 제어를 사용한 고효율 공진 모드 구현
- 하프 브리지 공진 LLC 컨버터 및 1차측 MOSFET 선택 시 설계 고려 사항
- 많은 유사 공진과 공진 컨버터 사용
- 파워 팁 #77: CCM 플라이백 컨버터 설계

이전에 [EDN.com](https://www.edn.com)에 게시되었습니다 .

## 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, 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 제안할 수 있는 추가 또는 기타 조건을 반대하거나 거부합니다.

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

Copyright © 2024, 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 © 2024, Texas Instruments Incorporated