통합형 GaN FET와 양면 냉각을 활용한 48V 벅 컨버터의 고전력 밀도 달성

Matthew Bowers
Systems engineer, power design services

소개

자동차, 산업용 및 데이터 센터 시스템에서 48V 전력 분배 아키텍처의 도입이 지속적으로 확대됨에 따라, 솔루션 크기를 최소화하면서 높은 출력 전류를 지원할 수 있는 소형 고효율 DC/DC 컨버터에 대한 수요가 증가하고 있습니다. 통합형 GaN(질화갈륨) 전력 컨버터는 스위칭 손실과 패키지의 기생 성분을 줄여 이러한 요구 사항을 충족하며, 기존 실리콘 기반 솔루션보다 높은 전력 밀도를 구현할 수 있습니다.

컨버터의 전력 밀도가 증가함에 따라 열 관리는 설계 시 고려해야 할 핵심 요소가 됩니다. 이 문서에서는 통합형 GaN 전력 IC(통합 회로)를 사용한 48V-12V 4상 동기 벅 컨버터를 살펴보고, 설계자가 양면 냉각 방식과 PCB(인쇄 회로 보드)의 열 확산을 함께 활용하여 고부하 작동 시 발생하는 전력 손실을 관리하는 방법을 보여줍니다.

고전력 밀도 변환을 위한 통합형 GaN

실리콘 금속 산화막 반도체 MOSFET(전계 효과 트랜지스터) 기술은 높은 공급 접근성과 검증된 성능을 바탕으로 전력 컨버터 설계의 기반 기술로 자리 잡아 왔습니다. 그러나 컨버터의 전력 수준과 전력 밀도에 대한 요구 사항이 지속적으로 높아짐에 따라, 기존 실리콘 기반 구현은 스위칭 손실과 패키지의 기생 성분으로 인해 점점 더 큰 어려움에 직면하고 있습니다. 통합형 GaN 전력 IC는 고속 GaN 전력 FET, 게이트 드라이버 및 제어 회로를 단일 패키지에 통합하여 기생 인덕턴스를 줄이고 컨버터 구현을 간소화함으로써 이러한 한계를 해결합니다. 또한 GaN의 뛰어난 스위칭 성능은 더 높은 스위칭 주파수에서의 작동을 가능하게 하여, 자기 및 용량성 부품의 크기를 줄이는 동시에 제어 루프의 응답 속도를 높일 수 있습니다.

GaN 전력 FET와 통합형 게이트 드라이버 사이의 기생 인덕턴스를 줄이면 스위칭 전환 과정에 대한 제어 성능도 향상되어 불필요한 링잉 현상과 이에 따른 스위칭 손실을 줄일 수 있습니다. 이러한 스위칭 동작의 개선은 EMI(전자기 간섭)를 줄이는 데 도움이 될 수 있으며, 이는 고회전율로 작동하는 고밀도 전력 컨버터에서 중요한 고려 사항입니다[1].

이 문서에서 소개하는 4상 컨버터 설계는 TI의 **LMG708B0** 통합형 GaN 전력 MCM(멀티칩 모듈) IC를 사용하여 48V에서 12V로의 스텝다운 변환에 요구되는 효율과 전력 밀도를 충족합니다.

열 문제 및 양면 냉각

통합형 GaN 전력 IC는 컨버터의 효율을 높이고 솔루션 크기를 줄일 수 있지만, 작은 패키지에 전력 손실이 집중되면서 열 밀도와 열유속이 증가합니다. 따라서 통합형 GaN의 성능 잠재력을 최대한 활용하려면 전기적 손실을 최소화하는 것뿐만 아니라 장치에서 발생한 열을 주변 환경으로 효과적으로 전달할 수 있는 열 방출 경로를 확보하는 것도 중요합니다. 전통적인 PCB 냉각 구현 방식에서는, 장치에서 발생한 열이 패키지를 통과해 PCB로 전도되어야 하며, 이곳에서 구리 면과 열 비아가 열을 주변 표면과 국부적인 주변 환경으로 분산시킵니다. 일반적인 경험 법칙에 따르면, 자연 대류 냉각 방식에서는 전력 손실 1W당 약 1in^{2}의 냉각 면적이 필요할 수 있습니다. 따라서 PCB의 열 확산 능력을 극대화하는 것은 고전력 밀도 컨버터에서 장치의 온도를 관리하기 위한 핵심 요소입니다.

양면 냉각 구조를 추가하면 LMG708B0 패키지에서 외부 냉각 인터페이스로의 병렬 열 경로가 제공됩니다. 이러한 추가 경로를 통해 PCB와 양면 냉각 구조 양쪽으로 열이 전달되므로, 접합부에서 주변 환경까지의 전체 열 저항을 낮출 수 있습니다. 따라서 상면 냉각 방식은 PCB 열 경로를 완전히 대체하는 것이 아니라 이를 보완하는 방식으로, 통합형 GaN 전력 IC의 작은 실장 면적을 유지하면서 추가적인 열 방출 능력을 제공합니다. **그림 1**에서는 패키지의 열 흐름 경로를 단순화하여 나타냅니다.

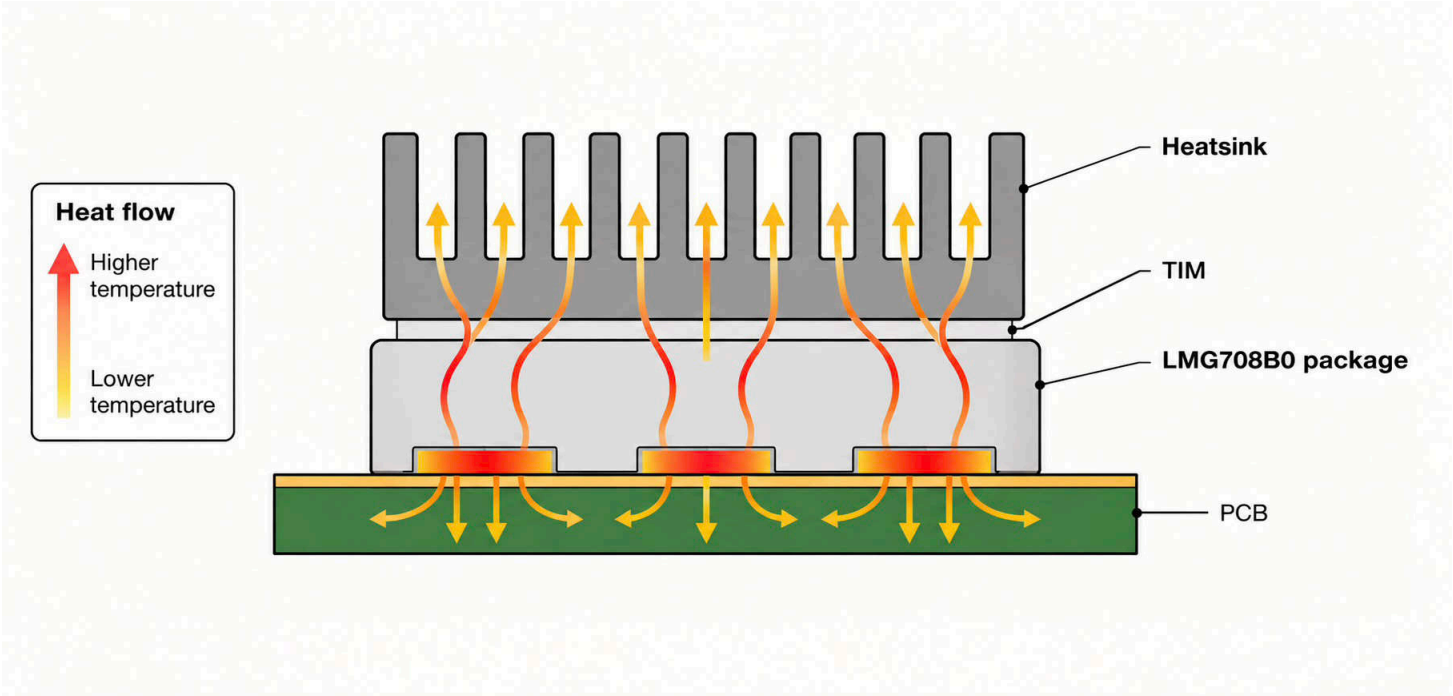


그림 1. *LMG708B0 통합형 GaN 전력 멀티칩 모듈 패키지를 통한 열 흐름 경로의 간략도*

GaN 컨버터 IC 설계 및 구현

열 관련 설계 고려 사항을 평가하기 위해 **통합형 GaN을 적용한 48V$_{IN}$, 960W 4상 벅 컨버터 레퍼런스 설계**를 사용했습니다. 4개의 인터리브 통합형 GaN 위상에 부하를 분산함으로써 각 위상의 전류와 전력 손실을 줄이는 동시에, 48V 전력 변환에 요구되는 고출력 전류 기능과 소형 솔루션 크기를 모두 구현할 수 있습니다. **표 1**에는 전체 설계 사양이 나와 있습니다.

설계 매개 변수	값
입력 전압	48V(36V~60V)
출력 전압	12V
출력 전류	80A(전기 설계 및 열 설계 전류)

설계 매개 변수	값
토폴로지	4상 동기 벅
스위칭 주파수	400kHz(각 위상)
전력계	LMG708B0 장치 4개
레퍼런스 설계 번호	PMP23595

표 1. *벅 컨버터 설계 사양*

이에 따른 온도 분포와 패키지, 냉각 구조 및 PCB를 통한 열 흐름을 평가하기 위해 열 시뮬레이션을 수행했습니다. 열 시뮬레이션은 Ansys Icepak® 열 모델링 소프트웨어 도구를 사용하여 수행되었습니다. **그림 2**에서는 주변 온도 25°C, 공기 흐름이 없는 조건에서 4개의 LMG708B0 장치 각각에 6.29W의 전력 손실을 적용하여, 전체 출력 960W로 동작하는 4상 벅 컨버터의 정상 상태 열 시뮬레이션을 보여줍니다. 전력 손실은 주변 온도 25°C에서 전체 출력 960W로 동작하는 레퍼런스 설계의 총 전력 손실을 구한 후, 주변 수동 소자에서 발생하는 손실을 차감하여 LMG708B0 장치에서 발생하는 전력 손실만을 산출했습니다. 장치의 전력 손실은 4개 위상 전체에서 총 25.16W에 해당합니다. 시뮬레이션된 4개 위상의 패키지 온도는 모두 약 108°C로 나타났으며, 이는 LMG708B0 장치의 권장 케이스 온도인 135°C보다 여전히 충분히 낮은 수준입니다.

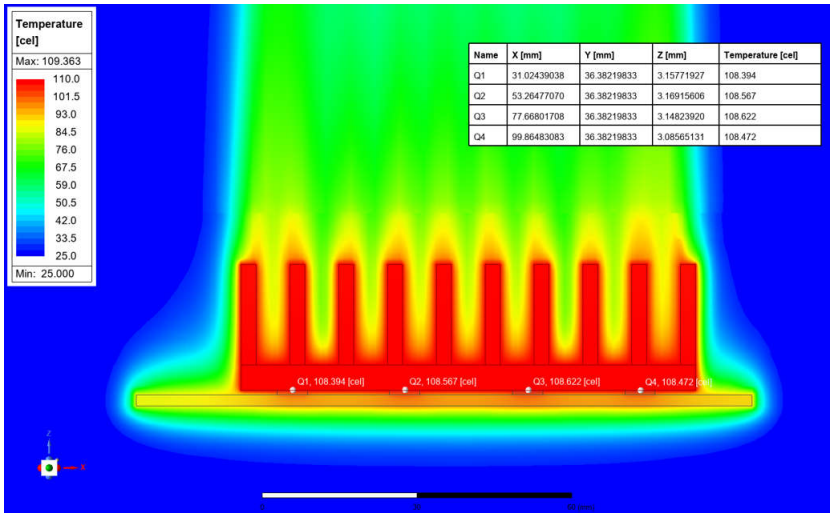


그림 2. *양면 냉각 구조를 적용한 4개의 통합형 GaN 전력계에 대한 열 시뮬레이션*

시뮬레이션은 또한 양면 냉각 구조와 PCB 양쪽을 통과하는 통합 GaN 장치의 열 경로를 보여줍니다. 그러나 이 시뮬레이션은 최종 하드웨어 구현의 근사치를 나타냅니다. 시뮬레이션에서 모델링한 히트 싱크의 형상은 최종 히트 싱크와 약간 다르며, LMG708B0 패키지와 히트 싱크 사이에 사용된 TIM(열 인터페이스 소재)은 고려되지 않았습니다. TIM은 케이스와 히트 싱크 사이에 추가적인 열 임피던스를 발생시키며, 이는 양면 냉각 경로의 전반적인 열 성능에 영향을 미칠 수 있습니다. 따라서 시뮬레이션을 통해 얻은 온도는 이 문서의 뒷부분에서 설명하는 컨버터의 실제 측정 성능과 비교하기 위한 열 레퍼런스를 제공합니다.

실험적 평가

컨버터 성능 평가를 위한 작동 부하 범위는 48V 입력 및 12V 출력에서 설정했습니다. **그림 3**에서는 출력 전류에 따른 측정 효율과 그에 상응하는 전력 손실을 보여줍니다. 두 지표를 함께 제시하면 컨버터의 성능을 더욱 종합적으로 파악할 수 있습니다. 효율은 전력 변환이 얼마나 효과적으로 이루어지는지를 나타내는 반면, 전력 손실 곡선은 컨버터가 방출해야 하는 열 부하를 나타냅니다. 양면 냉각 패키지의 효과를 극대화하기 위해 데이터를 측정하는 동안 히트 싱크를 부착했으며, 별도의 공기 흐름은 적용하지 않았습니다. 히트 싱크와 테스트 설정에 대한 자세한 내용은 이 문서의 뒷부분에서 설명합니다.

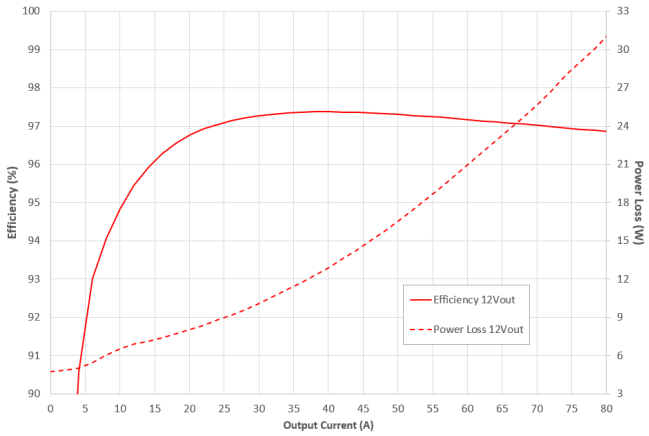


그림 3. *출력 전류에 따른 측정 효율 및 전력 손실*

경부하 조건에서는 인덕터 코어 손실, 게이트 드라이버 손실 및 기타 제어 관련 손실과 같이 비교적 일정하게 발생하는 손실이 변환 전력에서 차지하는 비율이 더 커집니다. 출력 전류가 증가함에 따라 출력 전력 대비 이러한 고정 손실의 비중이 감소하면서 효율이 향상되어 약 40A 부근에서 최대에 도달합니다. 이 지점을 지나면 저항성 도통 손실이 전류의 제곱(I^2R)에 대략 비례하여 증가하므로, 전류에 따라 달라지는 손실이 점차 지배적인 비중을 차지하게 됩니다. 따라서 전력 IC, 인덕터 및 PCB의 고전류 구리 배선에서 발생하는 도통 손실은 부하 전류가 증가함에 따라 급격히 커지며, 그 결과 컨버터가 전부하에 가까워질수록 효율이 점진적으로 감소합니다.

최대 효율에서 최대 부하까지 효율은 0.5%만 감소하지만, 이에 따른 전력 손실은 18.2W 증가합니다. 이러한 절대 전력 손실의 증가는 소형 컨버터의 제한된 면적 내에서 상당한 열 부하를 발생시키며, 전력계와 주변 부품에서 발생하는 열을 효과적으로 방출할 수 있는 경로를 확보하는 것이 중요함을 다시 한번 보여줍니다.

측정된 전력 손실 데이터는 **그림 2**의 열 시뮬레이션을 위한 배경 정보도 제공합니다. 시뮬레이션에서는 각 LMG708B0 IC의 손실을 6.29W로 설정했으며, 이는 80A의 전부하 작동 지점에서 4개 위상 전체에 걸쳐 25.16W에 해당합니다. 측정된 80A의 작동 지점에서 컨버터의 총 전력 손실은 31.2W입니다. 이 값들의 차이는 주로 인덕터, 전류 감지 션트 저항 및 PCB 전류 경로 등 컨버터의 다른 부품에 분포된 손실을 나타내며, 동시에 열 모델에 적용된 가정도 반영합니다. 그럼에도 불구하고 이러한 비교 결과는 전체 열 부하의 상당 부분이 4개의 통합형 GaN 전력 IC와 관련됨을 보여주며, PCB를 통한 열 확산을 보완하기 위해 전용 양면 냉각 방식을 적용할 필요가 있음을 뒷받침합니다.

열 성능

패키지 수준의 온도 분포와 양면 냉각 방식의 효과를 모두 분석하기 위해 두 가지 정상 상태 작동 조건에서 열 성능을 평가했습니다. **그림 4**에 표시된 첫 번째 측정은 히트 싱크를 제거한 상태에서 출력 전류를 50A로 설정하여 수행했으며, 이를 통해 열화상 카메라로 4개의 LMG708B0 패키지와 주변 PCB를 직접 관찰할 수 있도록 했습니다. 이 작동 조건에서 4상 구성은 600W의 출력 전력을 공급하며, 측정된 총 전력 손실은 약 16.6W입니다. 관측된 최대 온도는 약 97°C였으며, 가장 높은 온도는 전력계 영역 주변에 집중되었습니다.

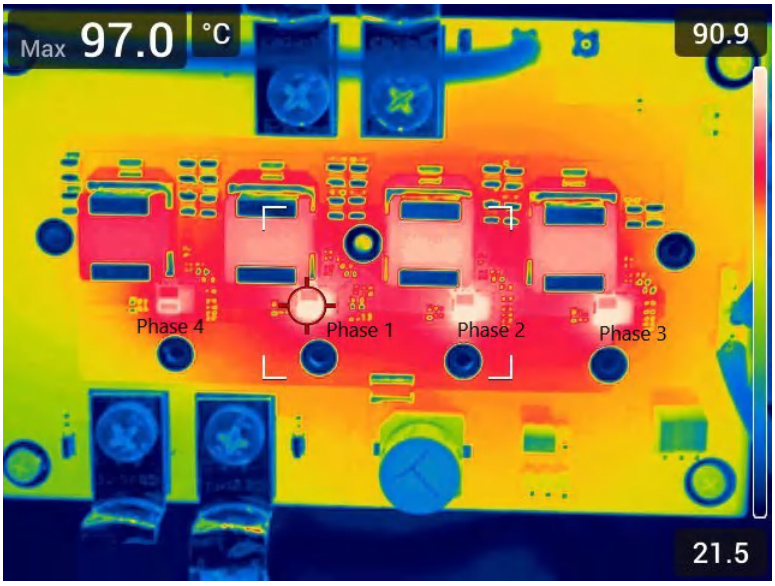


그림 4. *히트 싱크가 없는 50A 부하의 적외선 열화상 이미지*

이후 양면 냉각 구조의 효과를 극대화하기 위해 히트 싱크를 장착한 상태에서 최대 부하인 80A 조건으로 컨버터의 성능을 평가했습니다. 히트 싱크는 알루미늄으로 제작되었으며, 베이스 크기는 10.72cm(4.22인치) × 2.70cm(1.06인치), 높이는 1.61cm(0.63인치)입니다. 또한 히트 싱크에는 베이스에서 뻗어 있는 높이 2.54cm(1.00인치)의 핀 7개가 있습니다. 히트 싱크는 양면 냉각 패키지를 통해 IC에서 발생하는 열을 간단하면서도 효과적으로 외부로 방출할 수 있도록 설계되었습니다. 대부분의 애플리케이션, 특히 자동차 분야에서는 ECU(전자 제어 장치)의 하우징과 같은 더 큰 히트 싱크 또는 보다 최적화된 냉각 구조를 사용하여 더 높은 성능을 구현할 수 있습니다. 히트 싱크와 LMG708B0 장치 사이에 사용된 TIM은 두께가 1mm이고 열전도율이 20W/m·K인 T-WORK9000입니다. 이 작동 조건에서 컨버터는 960W를 공급하며, 이에 해당하는 컨버터의 총 전력 손실은 약 31.2W입니다. 히트 싱크가 통합형 GaN 패키지를 덮고 있는 상태에서, **그림 5**에 표시된 열화상 이미지는 주로 외부 냉각 구조와 주변 컨버터의 온도 분포를 보여줍니다. 열화상 이미지는 컨버터를 960W의 정상 상태에서 약 20분간 작동시켜 열평형 상태에 도달한 후 촬영되었습니다.

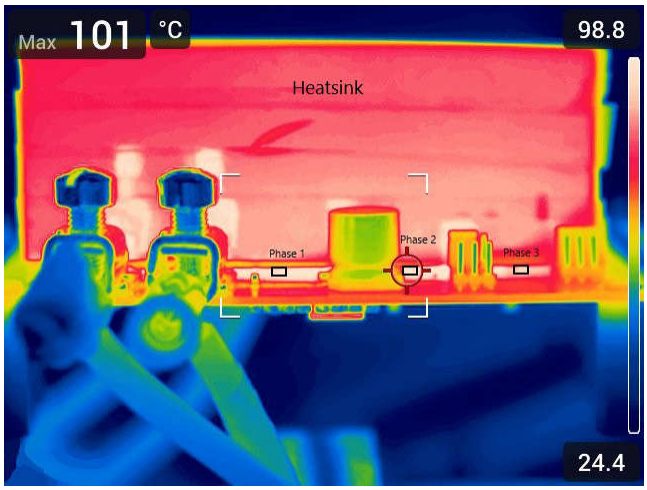


그림 5. *히트 싱크를 장착한 80A 부하의 적외선 열화상 이미지*

이 두 가지 측정 결과는 컨버터 설계에 적용된 상호 보완적인 열 경로를 보여줍니다. **그림 4**의 50A 측정 결과는 전력계와 PCB의 온도 분포를 직접 보여주는 반면, **그림 5**의 80A 측정 결과는 최대 작동 조건에서 전체 냉각 구조의 성능을 평가하고

양면 냉각 구조의 효과를 입증합니다. 이러한 결과는 80A 전부하 조건을 모델링한 **그림 2**의 열 시뮬레이션 결과를 보완합니다. **그림 5**에서는 전력계 영역을 부분적으로 보여주며, 각 IC의 온도가 약 101°C임을 나타냅니다. 주 LMG708B0 장치 위에 놓되, TIM과 히트 싱크 아래에 위치시킨 와이어 리드를 열 결합 방식으로 활용하여 더욱 정확한 케이스 온도를 측정했습니다. 주 LMG708B0 장치의 케이스 온도는 105.4°C였습니다. **그림 6**에서는 주 IC의 케이스 온도를 측정하는 데 사용된 설정을 보여줍니다.

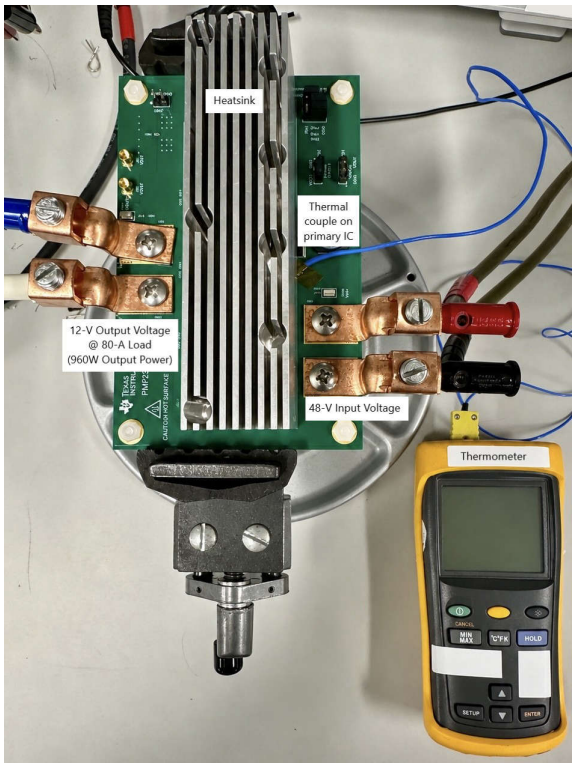


그림 6. *열 평가를 위한 테스트 설정*

이러한 결과는 열 시뮬레이션 결과와 일치하며, 양면 냉각 구조의 중요성을 보여줍니다. 또한 더 크거나 신뢰성이 높은 냉각 시스템을 사용하거나 팬을 추가하여 공기 흐름을 제공하면 온도를 더욱 낮출 수 있으며, 이를 통해 시스템 성능을 한층 향상할 수 있습니다.

결론

고전력 밀도 컨버터를 개발할 때는 개발 과정 전반에 걸쳐 전기적 성능과 열 성능을 모두 고려해야 합니다. 통합형 GaN 전력 IC는 효율과 전력 밀도를 향상할 수 있지만, 이러한 이점을 실현하려면 컨버터 아키텍처, PCB 레이아웃 및 열 관리를 신중하게 설계해야 합니다.

이 문서에서 소개하는 48V_{IN}에서 12V_{OUT}으로 변환하는 4상 동기 벅 컨버터 설계는 전체 컨버터 설계에 양면 냉각을 통합함으로써 높은 효율을 달성하는 동시에 고부하 조건에서 발생하는 전력 손실을 효과적으로 관리할 수 있음을 보여줍니다. 전기적 성능, 전력 손실 및 열 동작을 종합적으로 고려하면 높은 전류가 요구되는 48V 전력 변환 애플리케이션에 적합한 소형의 신뢰성 높은 통합형 GaN 전력 컨버터를 구현할 수 있습니다.

작성자 소개

Matthew Bowers는 TI의 전원 설계 서비스 팀에서 차량용 애플리케이션을 위한 전원 솔루션 개발을 담당하는 시스템 엔지니어입니다. 그는 2023년 텍사스 공과대학교에서 전기공학 학사 학위를 취득했습니다.

참고 자료

1. 텍사스 인스트루먼트. 2016년 3월. “**통합 드라이버를 통한 GaN 성능 최적화**.” 텍사스 인스트루먼트 백서 번호 SLYY085. 2026년 9월 22일에 액세스함.

추가 리소스

- 48V 다중 위상 애플리케이션의 최적화에 대해 자세히 알아보려면 “**전원 팁 #151: GaN을 활용한 48V 입력 다중 위상 벅 컨버터의 효율 향상**” 문서를 참조하십시오.

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.

Icepak® is a registered trademark of ANSYS, Inc.
모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

© 2026 Texas Instruments Incorporated

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