

Technical Article

1kW 고밀도 LLC 전원 모듈에 사용되는 평면 변압기 개요



Brent McDonald

데이터 센터 전력 수요가 증가함에 따라 서버 장비 제조업체들은 시스템의 열 풋프린트를 줄이기 위해 더 높은 전력 변환 효율성을 달성하고 있습니다. 12V 전력 분배 버스에서 48V 버스로 전환할 경우 고효율 소형 풋프린트 스텝다운 컨버터(48V~12V)가 필요합니다.

LLC(인덕터-인덕터-커패시터) 컨버터는 높은 스위칭 주파수의 넓은 부하 범위에서 ZVS(제로 전압 스위칭)를 유지할 수 있기 때문에 버스 컨버터에 널리 사용되는 토폴로지입니다. 이 전원 팁에서는 98% 이상의 효율을 가진 고밀도, 1MHz 1kW 1/8 브릭 LLC 컨버터에 사용되는 변압기에 대한 개요를 소개하겠습니다.

LLC 컨버터 설계

모든 실용적인 LLC 컨버터 설계는 공진 탱크의 설계에서 시작됩니다. LLC 컨버터를 최대한 효율적으로 만들기 위해 컨버터는 공진에 가까운 고정 주파수에서 개방형 루프 제어로 작동합니다. 변압기 누설 인덕턴스를 공진 인덕터로 사용하면 전체 컨버터의 크기가 최소화됩니다. 이 설계는 1MHz에서 작동하여 변압기 및 관련 패시브 부품의 크기를 가능한 한 작게 유지합니다. [그림 1](#)에서 이 설계에 대해 선택한 탱크 매개 변수를 보여줍니다. 이러한 매개 변수를 선택하는 방법에 대한 자세한 내용은 참조 [\[1\]](#) 및 [\[2\]](#)를 참조하십시오.

Turns ratio	4-to-1
L_r	7 nH
L_m	2 μ H
C_r	3.52 μ F

그림 1. 1MHz에서 작동하는 설계를 위한 LLC 탱크 매개 변수.

효율성을 극대화하려면 동기 정류기용 여러 개의 병렬 FET(전계 효과 트랜지스터)를 사용해야 합니다. [그림 2](#)에 표시된 매트릭스 변압기 구조는 여러 FET 간 공유를 강제합니다. 기능적으로 각 변압기는 1차측에서 2회 회전, 각 중심 탭 2차측에서 1회 회전을 합니다. 1차 권선을 직렬로 배치하면 각 1차 측에서 동일한 전류가 흐르게 되므로 2차측이 전류를 공유하게 됩니다.

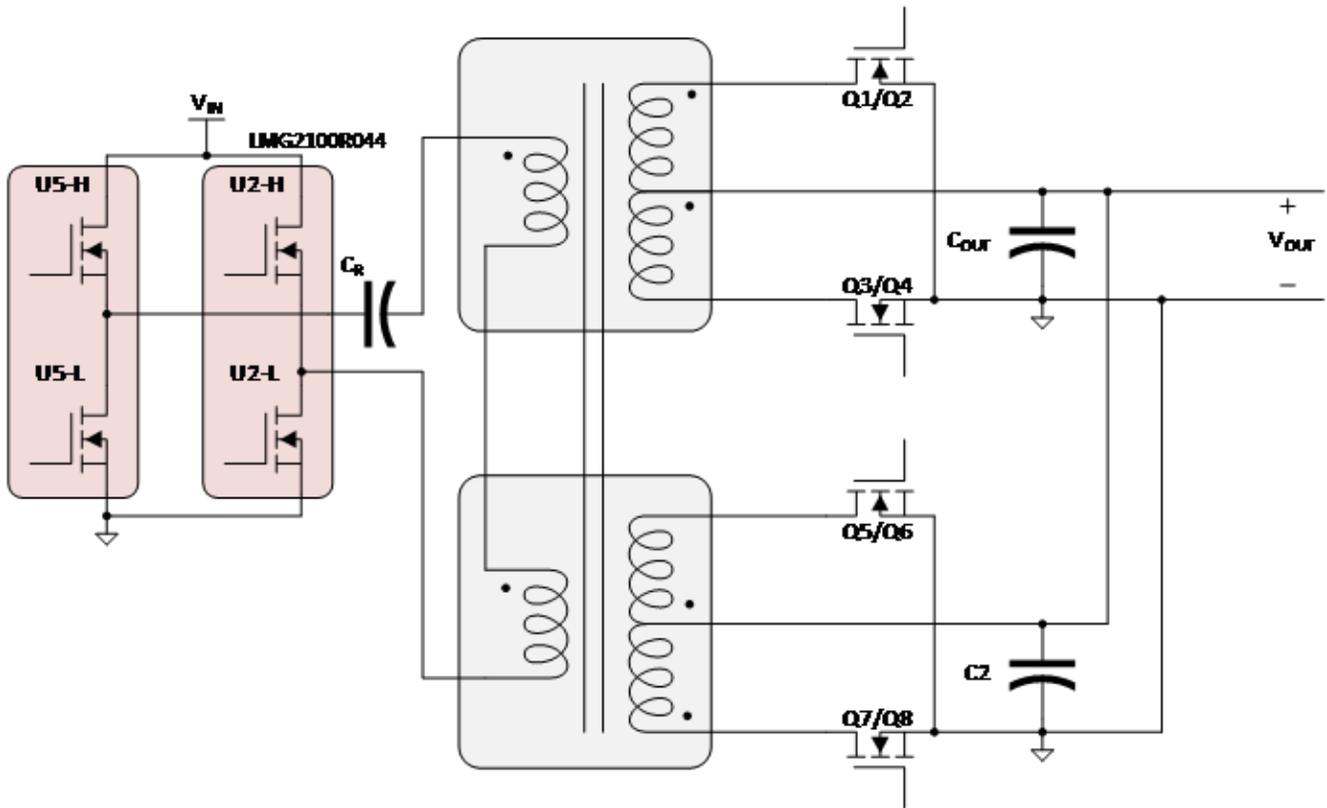


그림 2. 여러 FET 간 공유를 강제하는 매트릭스 변압기를 사용하는 LLC 컨버터. 출처: 텍사스 인스트루먼트

그림 3에서 그림 2에 표시된 두 변압기의 플럭스 경로를 보여줍니다. 첫 번째 이미지는 두 개의 개별 코어 사례를 보여줍니다. 중앙에 있는 인접 레그의 플럭스는 같지만 반대 방향이라는 것을 알 수 있습니다. 그림 3의 중간 도면에서 볼 수 있듯이, 이러한 레그를 단일 레그로 결합하면 순 플럭스 흐름이 0입니다. 이 코어의 레그에 플럭스가 없기 때문에 맨 오른쪽에 있는 이미지에서 볼 수 있듯이 레그를 제거할 수 있습니다.

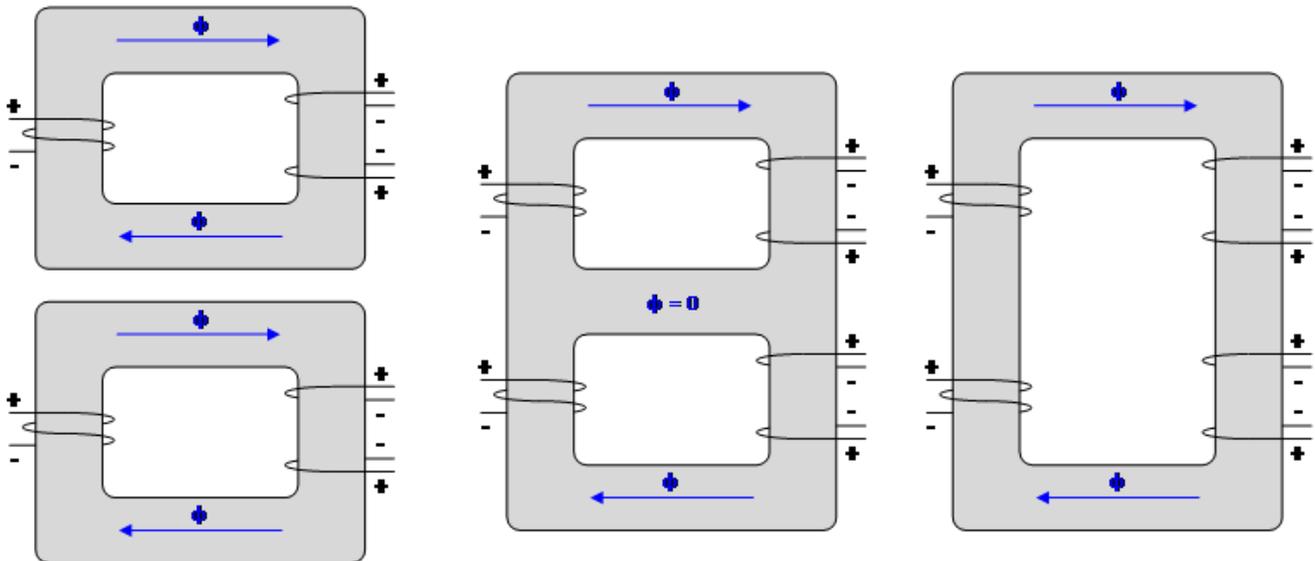


그림 3. 그림 2에 나와 있는 매트릭스 변압기 통합의 플럭스 경로. 출처: 텍사스 인스트루먼트

따라서 그림 2에 표시된 두 매트릭스 변압기 요소를 단일 변압기 코어에 통합할 수 있습니다. 그림 4에서 보여주는 것은 단일 페라이트 코어 [3]의 최종 통합 매트릭스 변압기를 사용한 LLC 컨버터의 회로도입니다.

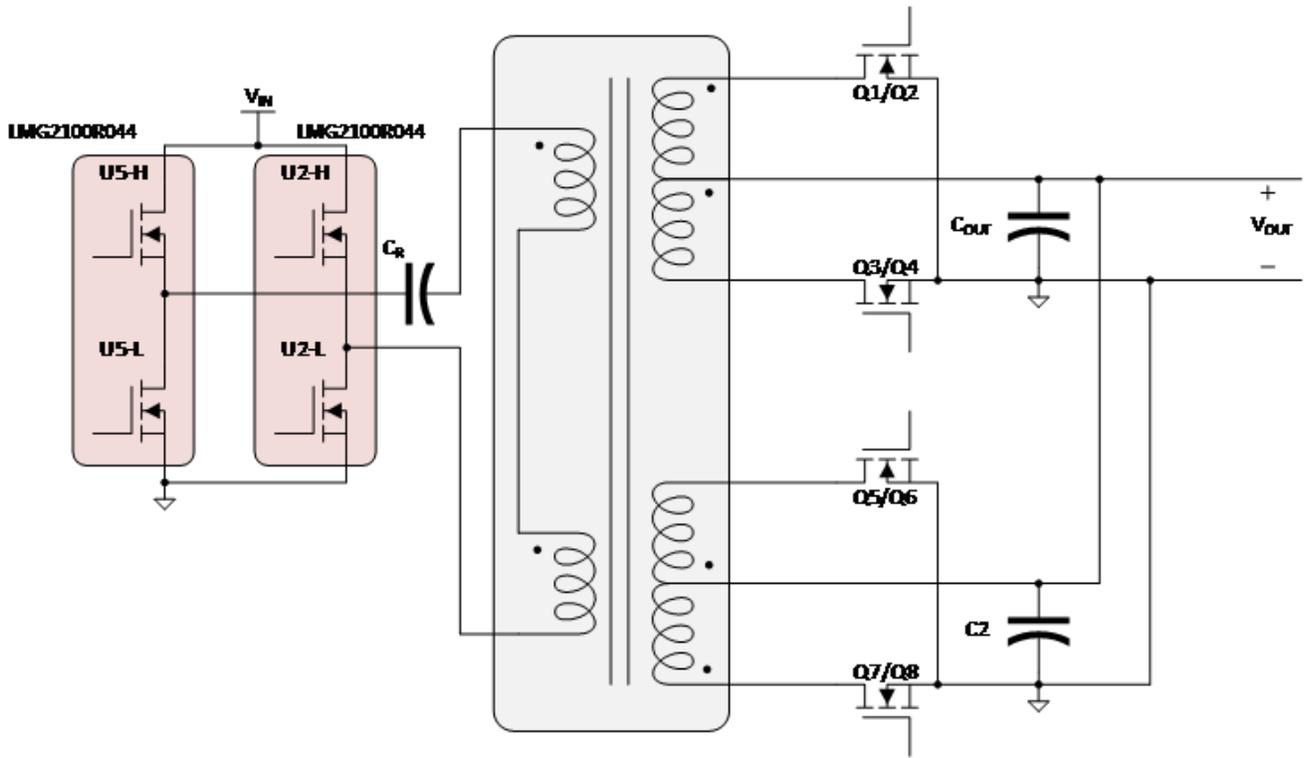


그림 4. 단일 페라이트 코어에 통합 매트릭스 변압기를 사용하는 LLC 컨버터. 출처: 텍사스 인스트루먼트

RMS 전류 예측

컨버터의 손실 대부분은 RMS(루트 평균 제곱) 전류에서 발생하므로, 변압기 권선의 RMS 전류를 추정할 수 있는 정확한 방법이 필요합니다. [4]에 제시된 방법은 컨버터가 공진 탱크의 것보다 약간 낮은 스위칭 주파수에서 작동할 때 자화 전류가 일정하게 유지된다고 가정하여 이를 수행합니다. 이러한 가정을 이용하면 LLC 컨버터 주요 파형의 구간 선형 근사치를 만들 수 있으며, 이러한 전류의 구간 선형 정의에서 방정식 1과 2에 표시된 것처럼 변압기 1차 전류 및 변압기 2차 전류에 대한 RMS 전류의 폐쇄형 식을 도출할 수 있습니다.

$$I_{1,rms} = \frac{V_{out}}{4nf_r^{3/2}L_M} \sqrt{\frac{f_s(4\pi^2f_r^2L_M^2(2t_{dead}f_r+1)^2+n^4R_{load}^2)}{2R_{load}^2} + n^4f_r - n^4f_s} \quad (1)$$

$$I_{2,sec,rms} = \frac{1}{4\sqrt{6}} \sqrt{\frac{f_sV_{out}^2}{f_r^3L_M^2} \left(\frac{3(4\pi^2f_r^2L_M^2(2t_{dead}f_r+1)^2+n^4R_{load}^2)}{R_{load}^2} - \frac{48n^4}{\pi^2} + 2n^4 \right)} \quad (2)$$

변압기 권선 설계

[2]에 제시된 권선 인터리빙 전략은 고주파 관련 손실을 최소화하도록 설계되었습니다. 그림 5에는 PWB(인쇄 와이어링 보드) 스택업을 보여줍니다.

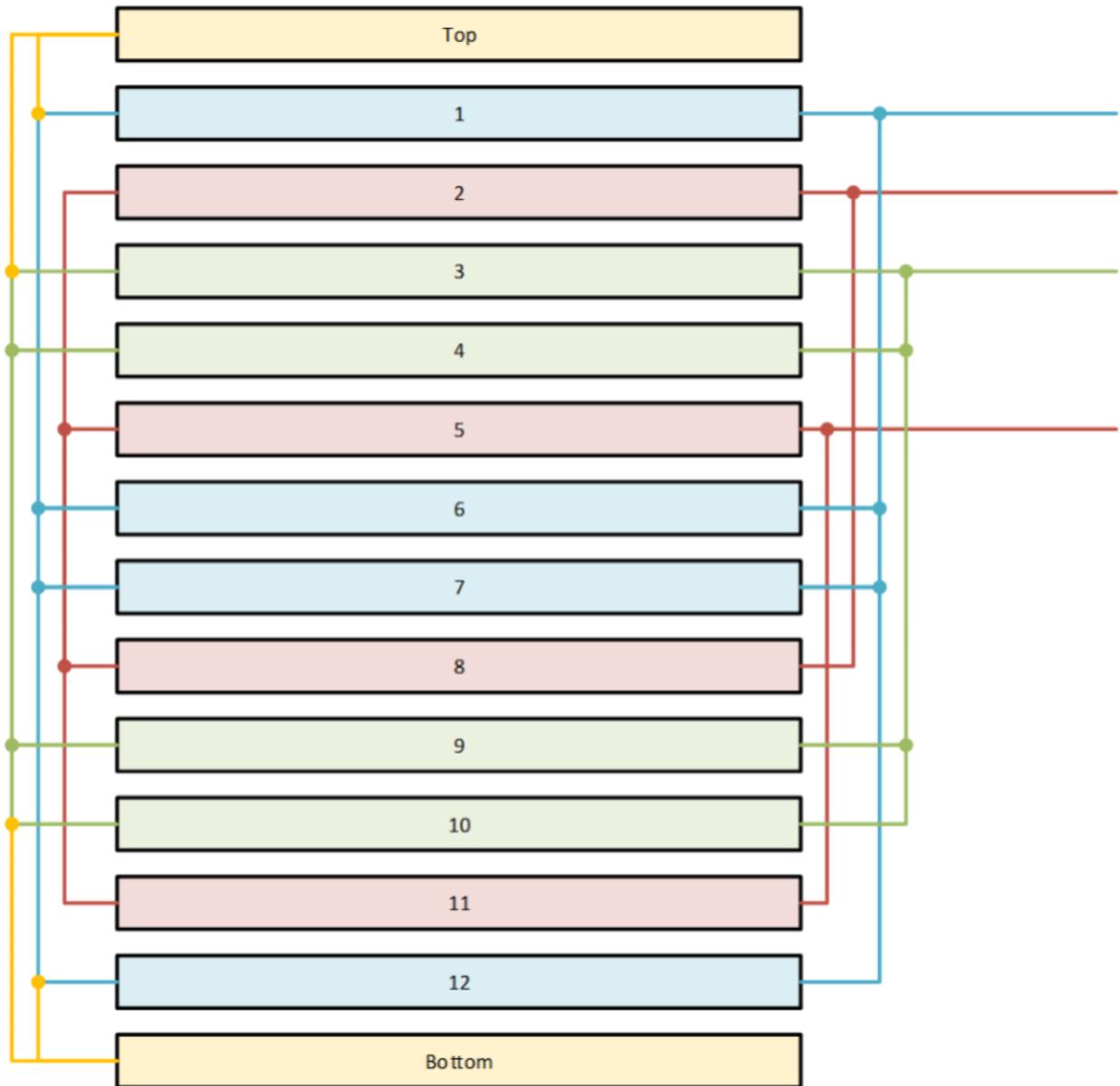


그림 5. 변압기 PWB 스택업. 출처: 텍사스 인스트루먼트

그림 5의 빨간색 권선은 4개의 PWB 레이어로 구성되어 있습니다. 각 계층에는 두 번의 회전이 있습니다. 계층 2와 5는 계층 8과 11처럼 직렬로 되어 있습니다. 또한 계층 2와 5는 계층 8과 11과 병렬로 연결됩니다. 그림 6에서는 실제 PWB 계층을 보여줍니다. 빨간색과 주황색의 구리 모양이 변압기 1차입니다. 또한 그림 6에서는 스위칭 기간의 양의 절반 동안 노란색 선으로 전류 흐름 방향을 보여줍니다.

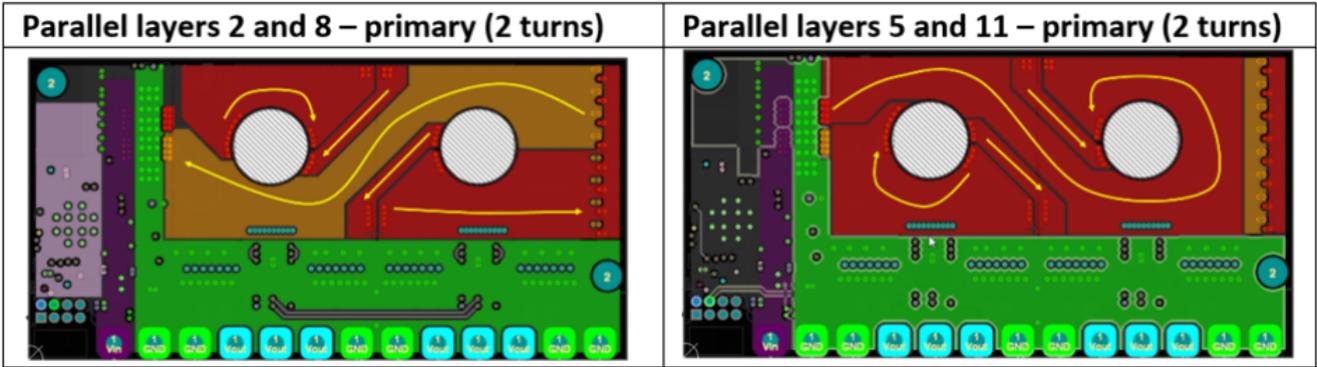


그림 6. 변압기 1차 구리 계층이 빨간색과 주황색인 실제 PWB 계층. 출처: 텍사스 인스트루먼트

그림 5의 파란색 계층은 모두 병렬로 연결되어 변압기 2차 중 하나를 형성합니다. 그림 5의 녹색 계층은 파란색과 동일하지만 다른 변압기 2차 계층에 해당합니다. 그림 7에서는 실제 PWB 계층을 보여줍니다. 청록색으로 표시된 구리 모양은 변압기 2차입니다. 중앙 탭의 양의 절반은 왼쪽에 표시되고 음의 절반은 오른쪽에 표시됩니다. 또한 그림 7에서는 스위칭 기간의 양의 절반 동안 노란색 선으로 전류 흐름 방향을 보여줍니다.

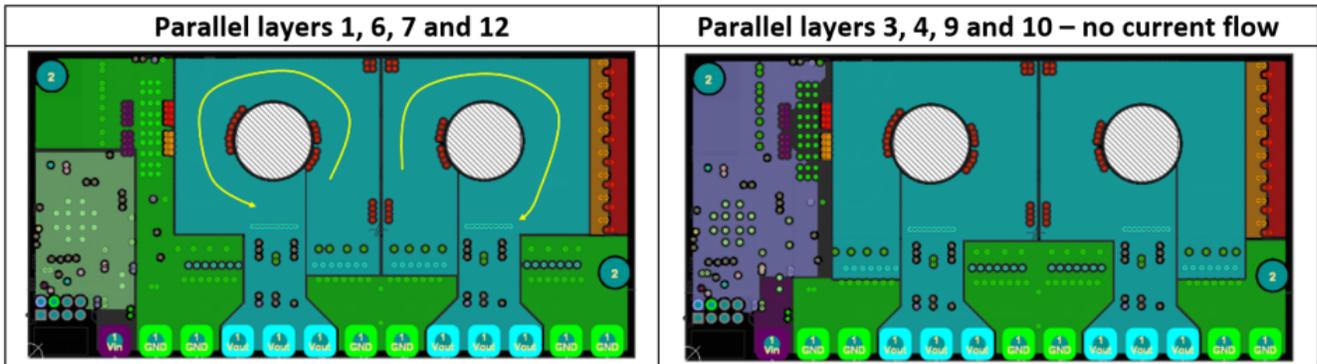


그림 7. 청록색의 변압기 2차 구리 계층이 있는 실제 PWB 계층. 중심 탭(왼쪽)의 양의 절반(오른쪽)과 음의 절반(오른쪽)이 있음. 출처: 텍사스 인스트루먼트

이 권선 구조는 AC 손실을 최소화하는 데 효과적이지만 권선 손실을 0으로 줄이지는 않습니다. 이러한 손실을 더 잘 근사하려면 먼저 권선의 DC 저항을 더 잘 추정해야 합니다. 이 작업은 실제 권선 지오메트리에 대한 정확한 평면 권선 아크와 DC FEA(유한 요소 해석) 모델 간의 차이를 계산하여 수행됩니다. 정확한 평면 호의 저항 공식은 방정식 3에 나와 있습니다.

$$R_{ca} = \frac{2 \times \pi}{\sigma \cdot h_{cu} \times \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3)$$

여기서 σ 는 구리의 전도율은 구리층 두께, r_1 은 호의 내부 반경, r_2 는 호의 외부 반경입니다.

그림 8은 원형 호의 DC FEA 모델과 정확한 권선 지오메트리를 비교한 것입니다. 모델의 4분의 1만 사용하면 계산 복잡성이 줄어듭니다. R_+ 와 R_- 는 FEA 모델 결과에서 얻은 권선 저항의 두 가지 독립적인 계산이며, R_{ca} 는 방정식 3의 출력입니다. 왼쪽 플롯은 방정식 3에 대해 FEA 모델을 보정합니다. 오른쪽 플롯은 방정식 3과 실제 지오메트리 간의 오차를 결정합니다. 이 오차를 환산 계수로 사용하면 실제 지오메트리와 더 밀접하게 연관되도록 모델을 조정할 수 있습니다.

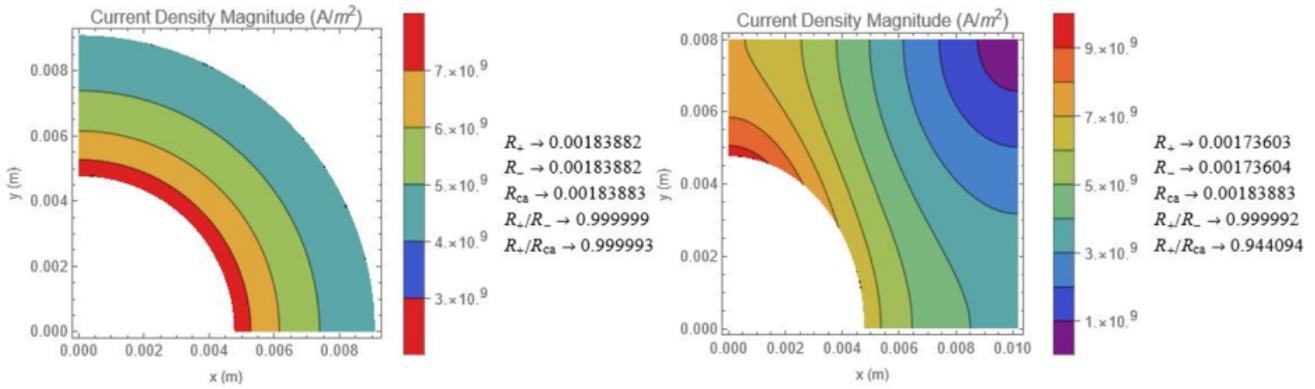


그림 8. 왼쪽 플롯은 방정식 3에 대해 FEA 모델을 보정하고 오른쪽 플롯은 방정식 3과 실제 지오메트리 간의 오차를 결정하는 유한 요소 권선 DC 저항 추정치. 출처: 텍사스 인스트루먼트

방정식 4는 [5]의 보정 및 AC 손실 영향을 포함한 최종 권선 손실 방정식입니다.

$$R_{ac} = \frac{R_+}{R_{ca}} \frac{2 \times \pi}{\sigma \times h_{cu} \times \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \times \text{Re}\left(\sqrt{j \times 2 \times \pi \times f_s \times \mu_0 \times \sigma \times h_{cu}} \times \coth\left(\sqrt{j \times 2 \times \pi \times f_s \times \mu_0 \times \sigma \times h_{cu}}\right)\right) \quad (4)$$

여기서 f_s 는 스위칭 주파수이고 μ_0 은 $4 \times \pi \times 10^{-7}$ 입니다.

Ansys FEA 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션된 LLC 컨버터 파형에서 과도 여자 하에서의 변압기 권선 손실을 확인할 수 있습니다. 방정식 4는 Ansys 과도 FEA 모델을 1% 이내로 일치시켰습니다.

테스트 결과

그림 9은 하드웨어 이미지입니다.

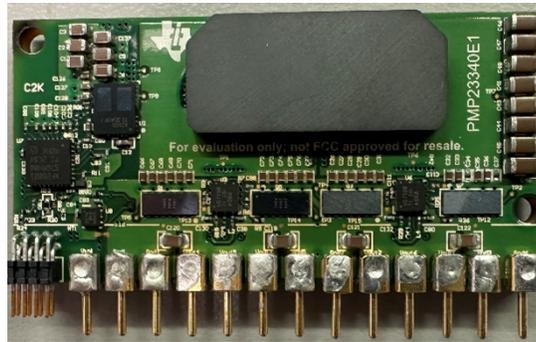


그림 9. 1/8 브릭 LLC 컨버터 프로토타입 하드웨어. 출처: 텍사스 인스트루먼트

그림 10에서는 하드웨어에서 측정된 손실과 효율성을 보여줍니다. 이 데이터는 48V 입력 정전류 부하와 강제 공기로 수집되었습니다. 또한 그림 10에서는 모듈 효율을 보여주고 예측상 손실과 측정된 손실을 비교합니다.

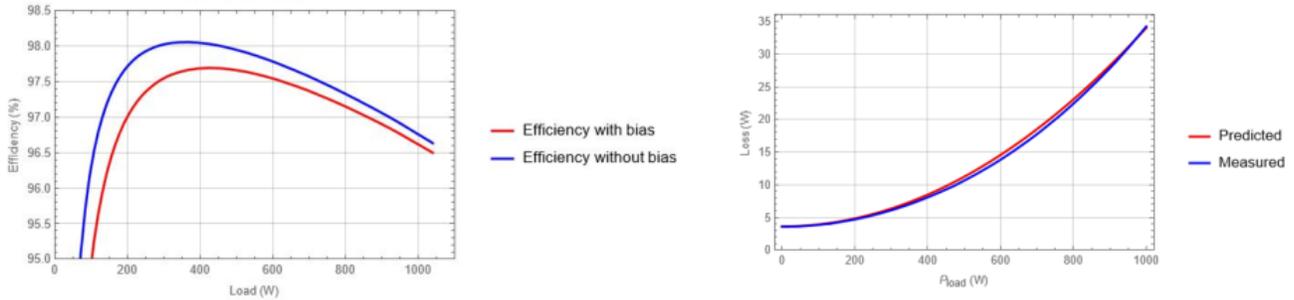


그림 10. 프로토타입 하드웨어에 대해 측정된 효율성, 손실 및 조정. 출처: 텍사스 인스트루먼트

LLC 컨버터용 변압기 개요

이 전원 팀은 고효율 LLC 컨버터에 분석적으로 타당한 변압기 구조와 권선 손실 예측 방법을 제시했습니다. 이 방법론은 LMG2100 [6]과 같은 고성능 GaN 스위치와 함께 사용하면 데이터 센터 전원 공급 장치 설계자가 더 작지만 효율이 더 높은 버스 컨버터를 설계할 수 있습니다.

관련 콘텐츠

- 전원 팀 #121: 액티브 스너버를 사용한 위상 변이 풀 브리지 효율성 개선
- 전원 팀 #120: 절연 바이어스 변압기 기생 커패시턴스가 EMI 성능에 미치는 영향
- 전원 팀 #119: 전력 변압기의 EMI 성능 특성을 분석하는 방법
- 전원 팀 #118: 인터리브 접지면을 사용하여 절연 전원 공급 장치의 잡음 필터링 개선

참고 자료

1. Huang, Hong. “Designing an LLC Resonant Half-Bridge Power Converter(LLC 공진 하프 브리지 전원 컨버터 설계).” Texas Instruments Power Supply Design Seminar SEM1900, literature No. SLUP263, 2010-2011.
2. Bing Lu, Wenduo Liu, Yan Liang, F.C. Lee, and J.D. van Wyk. “Optimal Design Methodology for LLC Resonant Converter(LLC 공진 컨버터에 대한 최적의 설계 방법론).” 21주년 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 19-23, 2006, 6 pp. doi: 10.1109/APEC.2006.1620590에 게시되었습니다.
3. Ahmed, Mohamed. 2019. “Power Architectures and Design for Next Generation Microprocessors(차세대 마이크로프로세서용 전력 아키텍처 및 설계).” Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
4. Liu, Ya. 2007. “High Efficiency Optimization of LLC Resonant Converter for Wide Load Range(넓은 부하 범위용 LLC 공진 컨버터의 고효율 최적화).” Master’s thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
5. Dowell, P.L. “Effects of Eddy Currents in Transformer Windings(변압기 권선의 와전류 효과).” Proceedings IEE (UK) 113, no. 8 (August 1966): pp. 1387-1394에 게시되었습니다.

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://www.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