

Technical Article

GaN 스위치 통합으로 PFC에서 낮은 THD와 높은 효율성을 구현하는 방법



Brent McDonald

기존의 연속 전도 모드(CCM) 제어에서는 낮은 부하에서 PFC(역률 보정)를 개선하고 피크 효율을 높이기 위한 비용 효율적인 솔루션이 필요합니다. 엔지니어는 이러한 문제를 해결하기 위해 복잡한 다중 모드 솔루션에 대해 상당한 연구를 수행하고 있습니다[1], [2]. 이러한 접근 방식은 인덕터 크기를 줄이는 동시에 가벼운 부하에서 소프트 스위칭으로 효율성을 높일 수 있다는 점에서 매력적입니다.

그러나 이 전원 팁에서는 복잡한 다중 모드 제어 알고리즘을 사용할 필요가 없고 모든 작동 조건에서 제로 스위칭 손실을 달성하는 고효율 및 낮은 THD(총 고조파 왜율)를 달성하기 위한 새로운 접근법을 소개합니다. 이 접근 방식에서는 제로 전압 스위칭(ZVS)으로 스위치가 켜지는지 여부를 나타내는 통합 플래그가 있는 고성능 GaN(질화 갈륨) 스위치를 사용합니다. 이 접근 방식은 모든 작동 조건에서 고효율 ZVS를 가능하게 하는 동시에 THD를 매우 낮게 강제 적용합니다.

토폴로지

이 시스템에 사용되는 토폴로지는 통합된 삼각형 전류 모드(iTCM) 토템 폴 PFC[3]입니다. 고전력 및 고효율 시스템의 경우, 토템 폴 PFC는 전도 손실에 대한 뚜렷한 장점을 제공합니다. 이 토폴로지의 TCM 버전은 [4]에서 스위치가 켜지기 전에 인덕터 전류가 항상 충분히 마이너스가 되도록 함으로써 ZVS를 시행합니다. 그림 1은 토템 폴 PFC의 iTCM 버전을 보여줍니다.

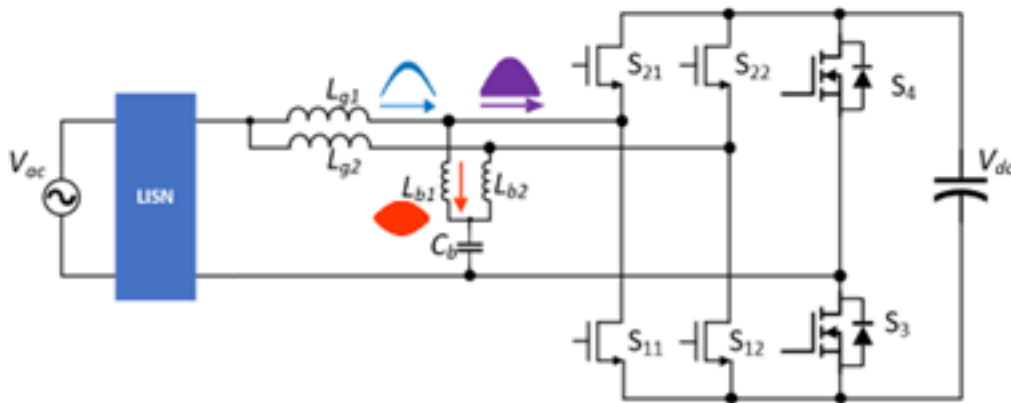


그림 1. AC 라인 주파수 전류 엔벨로프를 보여주는 iTCM 토폴로지.

TCM 컨버터와 iTCM 컨버터의 차이점은 L_{b1} , L_{b2} 및 C_b 의 존재 여부입니다. 정상 작동 시 C_b 의 전압은 입력 전압 V_{ac} 와 동일합니다. 위상이 180도를 이루도록 작동하는 2상은 리플 전류 취소를 활용하고 C_b 의 루트 평균 제곱 전류 스트레스를 줄입니다. L_{b1} 및 L_{b2} 의 크기는 TCM 작동에 필요한 고주파 AC 리플 전류만 처리할 수 있습니다. 이를 통해 [4]에 정의된 대로 TCM에 사용되는 인덕터에 필요한 DC 바이어스를 제거합니다. L_{b1} 및 L_{b2} 용 페라이트 코어는 ZVS에 필요한 높은 플럭스 스윙이 있는 상태에서 낮은 손실을 보장하는 데 도움이 됩니다. L_{g1} 및 L_{g2} 는 L_{b1} 및 L_{b2} 에 비해 값이 10배 더 큼니다. 이는 대부분의 고주파 전류가 입력 소스로 흐르는 것을 방지하고 전자기 간섭(EMI)을 줄입니다. 또한 L_{g1} 및 L_{g2} 에서 리플 전류가 감소하여 저렴한 코어 물질을 사용할 수 있습니다. 또한 그림 1에는 여러 주요 분기에 대한 리플 전류 엔벨로프가 나와 있습니다.

제어

텍사스 인스트루먼트(TI) TMS320F280049C 마이크로컨트롤러 및 LMG3526R030 GaN 전계 효과 트랜지스터(FET)를 통해 제어를 지원합니다. 이러한 FET에는 ZVS를 사용하여 스위치가 켜질 때마다 어설션되는 통합 제로 전압 감지(ZVD) 신호가 있습니다. 마이크로컨트롤러는 ZVD 정보를 사용하여 스위치 타이밍 매개 변수를 조정함으로써 ZVS를 달성할 수 있을

정도의 전류로 스위치를 켭니다. 단순성을 위해 그림 2에서는 단상 iTCM PFC 컨버터를 보여줍니다. 표 1은 이 그림에 사용된 주요 변수를 정의합니다. 마이크로컨트롤러는 시스템의 정확한 차동 방정식 세트를 해결하는 알고리즘을 사용합니다. 이 방정식은 두 스위치 모두에 ZVS를 적용하고 전류를 현재 명령과 같도록 강제하는 조건을 사용합니다. 시스템이 두 스위치 모두에 대해 적절한 양의 ZVS로 작동하고 있다면 방정식은 정확합니다. 알고리즘이 올바르게 작동하면 0% THD에 대한 타이밍 매개 변수와 최적의 ZVS 양을 산출합니다. ZVS 상태를 용이하게 하기 위해 각 스위치(S₁ 및 S₂)는 사이클 단위로 각각의 ZVS 턴온 상태를 마이크로 컨트롤러에 다시 보고합니다. 그림 2에서 V_{hs,zvd} 및 V_{ls,zvd}는 ZVD 보고를 나타냅니다.

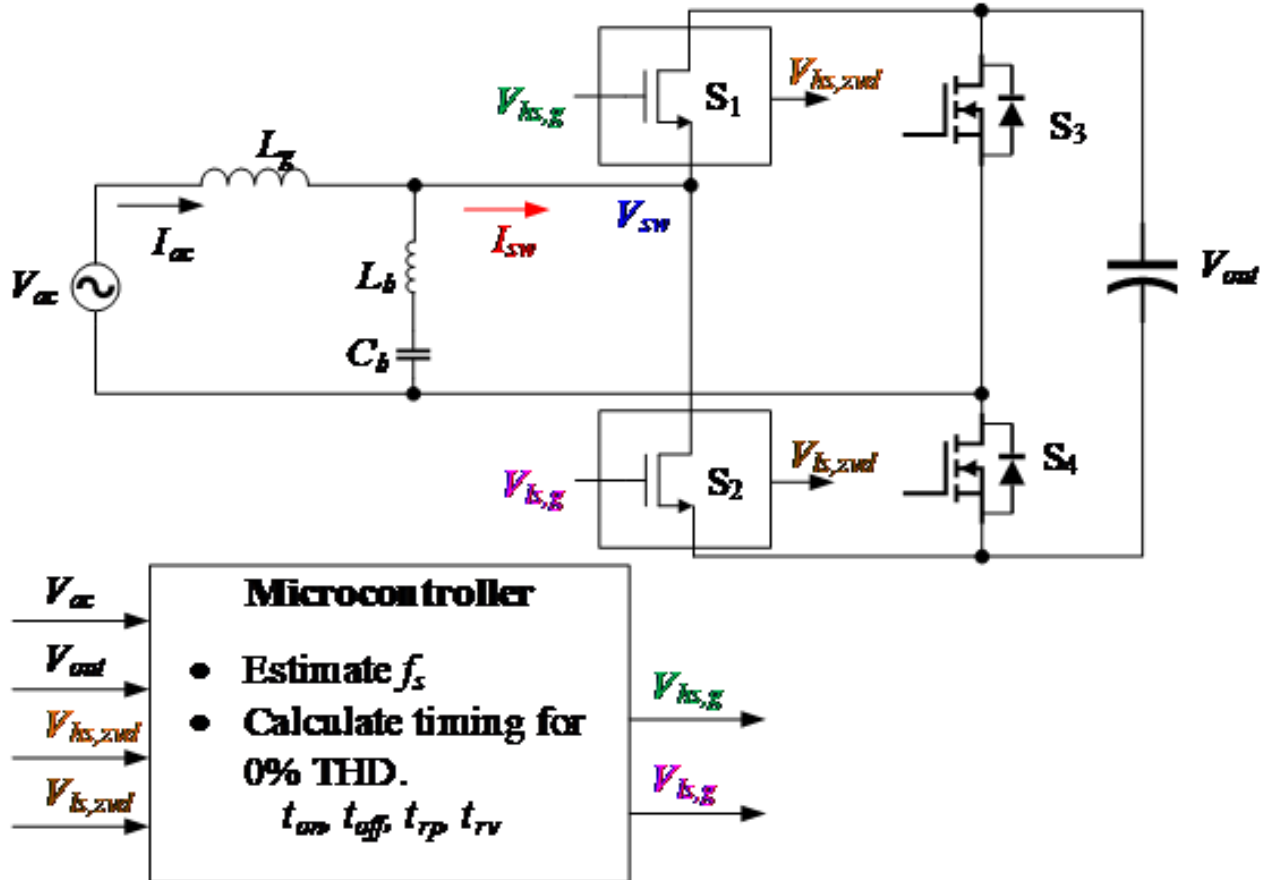


그림 2. 제어 신호가 포함된 단상 iTCM 회로도

표 1. 타이밍 매개 변수 및 정의를 전환합니다.

Timing parameter	Definition
f_s	Switching frequency
t_{on}	This is the control switch on time; during the positive half cycle, the control switch is S ₂ ; during the negative half cycle, the control switch is S ₁
t_{off}	This is the off time of the control switch
t_{rp}	This is the dead time between the turnoff of the control switch and the turnon of the synchronous rectifier
t_{rv}	This is the dead time between the turnoff of the synchronous rectifier and the turnon of the control switch

그림 3에는 ZVD 타이밍 조정 프로세스가 나와 있습니다. 모든 스위칭 사이클 동안 마이크로 컨트롤러는 ZVD 신호의 누적 이력을 기반으로 스위치 타이밍 매개 변수(t_{on} , t_{off} , t_{rp} 및 t_{rv})를 계산합니다. 그림 3b는 시스템이 이상적인 주파수에서 작동하는 것을 보여줍니다. 이상적으로 보면 THD가 0%이고, 고압측 및 저압측 FET에 완벽한 ZVS가 있다는 것입니다. 그림 3a는 작동 주파수가 이상적인 것보다 50kHz 낮을 때 어떤 일이 발생하는지를 보여줍니다. 고압측 FET는 ZVS가 손실되지만(고압측 ZVD 신호의 손실로 표시됨) 저압측 FET는 ZVS를 달성하는 데 필요한 것보다 더 많은 음극 전류가 있음을 알 수 있습니다. 그 결과 효율 손실과 전력 역율이 왜곡됩니다. 그림 3c는 작동 주파수가 이상적인 것보다 50kHz 더 높은 경우 발생합니다. 이

경우 고압측 FET에는 ZVS가 있지만 저압측 FET는 ZVS를 잃게 됩니다. 다시 말하지만 효율성과 왜곡의 명백한 손실이 있습니다.

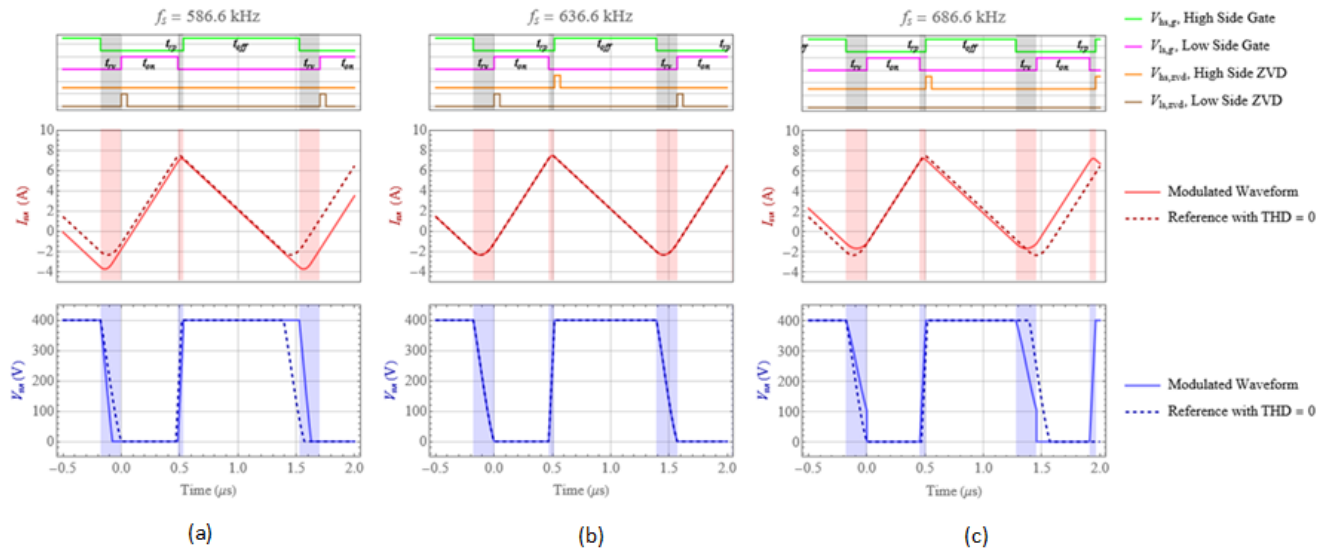


그림 3. 낮은 f_s (a), 이상적인 f_s (b) 및 높은 f_s (c)에서의 ZVD 동작.

ZVD 신호의 유무에 따라 컨트롤러는 주파수를 높이거나 낮추어 시스템을 최적의 작동 지점으로 밀어 넣을 수 있습니다. 이러한 방식으로 제어 노력은 최적의 작동 주파수를 찾으려는 통합기처럼 작동합니다. 시스템이 주기마다 거의 ZVS를 얻기 힘든 임계값에서 바로 마우스 커서를 사용할 때 최적 상태가 발생합니다.

프로토타입 성능

그림 4은 지금까지 설명한 토폴로지 및 알고리즘으로 제작된 프로토타입을 보여줍니다.

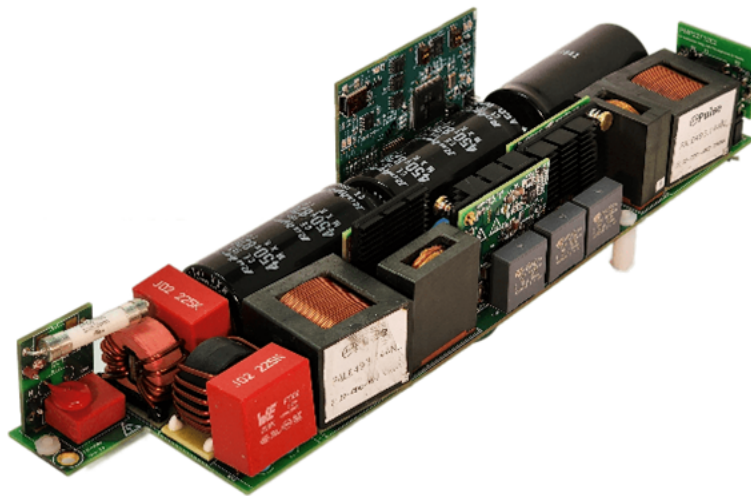


그림 4. 120W/in³의 전력 밀도를 지원하는 400V, 5kW 프로토타입.

표 2에 보면 프로토타입의 사양 및 중요한 구성 요소 값이 요약되어 있습니다.

표 2. 시스템 사양 및 주요 부품

Parameters	Value
AC input	90 V-264 V
Line frequency	50-60 Hz
DC output	400 V
Maximum power	5 kW
Holdup time at full load	20 ms
L_g , low-frequency inductor	140 μ H
L_b , high-frequency inductor	14 μ H
C_b , high-frequency blocking capacitor	1.5 μ F
THD	Open Compute Project (OCP) v3
EMI	European Standard 55022 Class A
Operating frequency	Variable, 75 kHz-1.2 MHz
Microcontroller	TMS320F280049C
High-frequency GaN FETs (S_{11} , S_{12} , S_{22} , S_{21})	LMG3526R030
Low-frequency silicon FETs (S_3 , S_4)	IPT60R022S7XTMA1
Internal dimensions	38 mm \times 65 mm \times 263 mm
Power density	120 W/in ³

그림 5은 프로토타입 측정 노드를 보여주고 그림 6는 최대 전력(5kW)으로 작동하는 프로토타입의 시스템 파형을 보여줍니다. 스위치 노드 전류 $I_{L,A}$ 및 $I_{L,B}$ 는 각 분기에 대한 L_g 와 L_b 전류의 합입니다. 플롯의 확대/축소 섹션은 양의 반주기 동안의 파형 세부 정보를 보여줍니다. 전류 파형은 이상적인 삼각형 모양을 가지고 있으며 스위치 노드 전압 V_A 및 V_B 에 의해 시연되는 것처럼 ZVS를 달성할 수 있을 충분한 음극 전류만 가지고 있습니다. 또한, 전류 파형의 시누소이드 엔벨로프가 낮은 THD를 제안합니다.

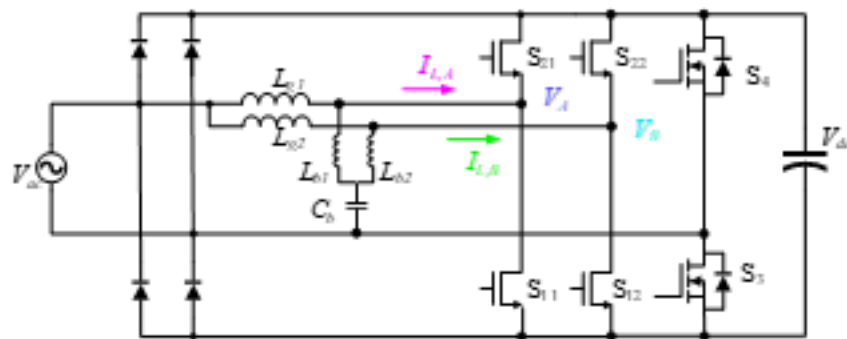


그림 5. 프로토타입 측정 노드

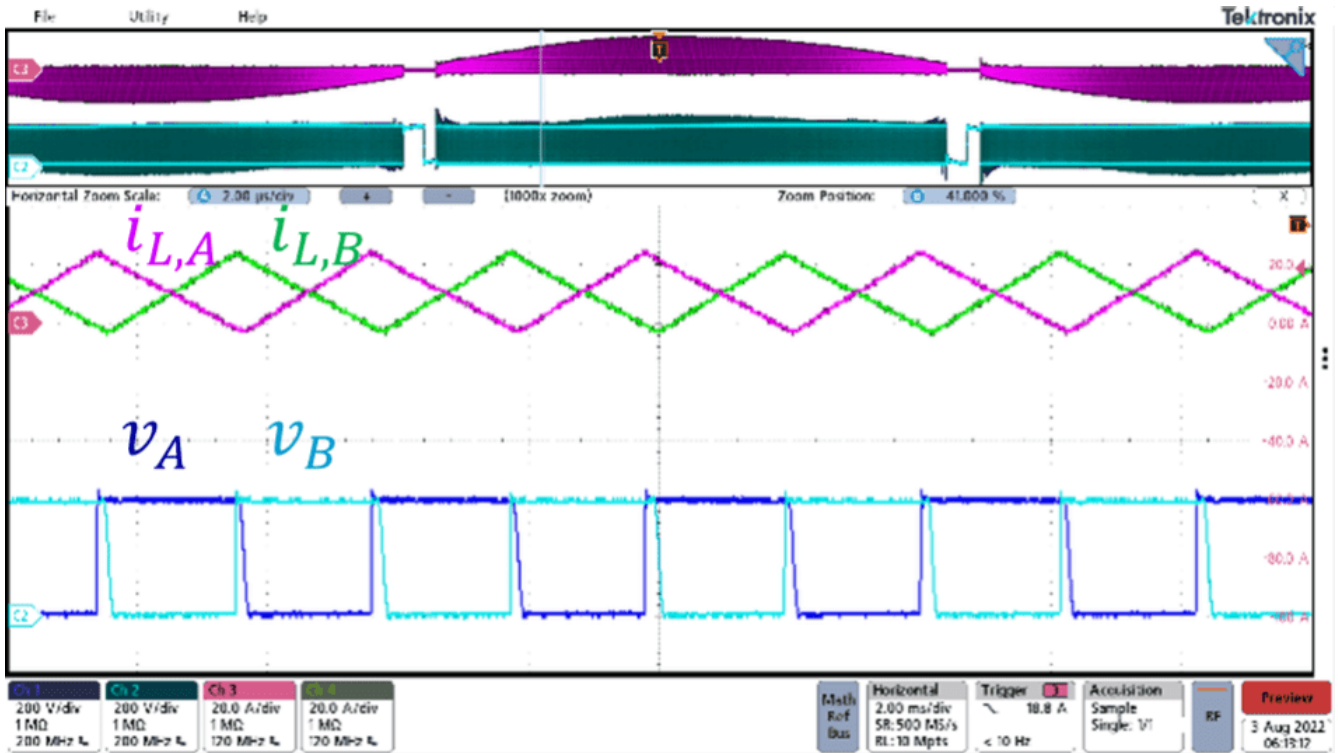


그림 6. 최대 전력($V_{in} = V_{out}/2$, load = 5 kW, $V_{in} = 230 V_{ac}$, $V_{out} = 400 V$)으로 작동하는 프로토타입의 시스템 파형.

그림 7에서는 부하 범위에서 측정된 효율성과 THD를 보여줍니다. 효율이 99% 이상이고 거의 전체 부하 범위에서 98.5% 이상입니다. THD는 최대 10%이며 대부분의 부하 범위에서 5% 미만입니다. 성능을 최적화하기 위해 단위 위상은 약 2kW에서 위상을 제거하거나 추가합니다.

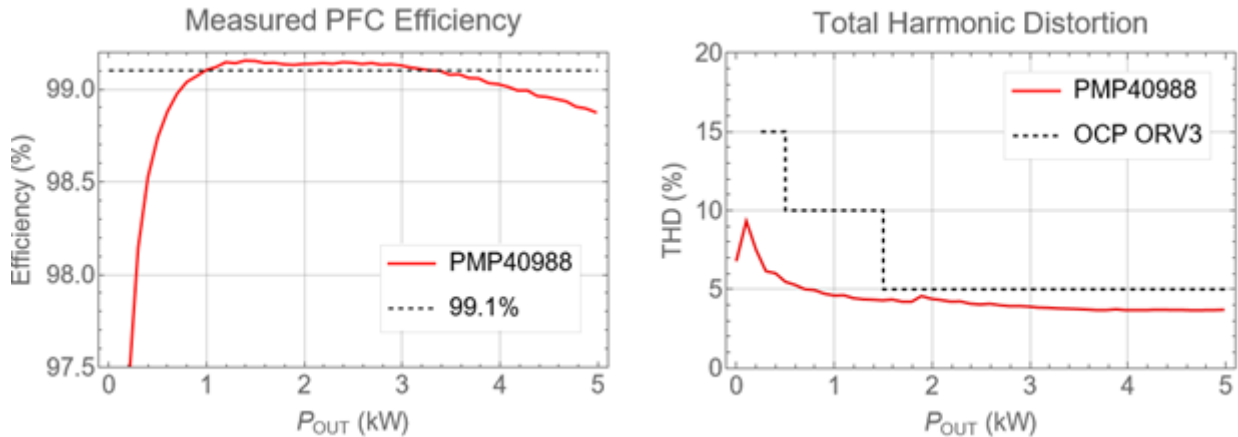


그림 7. 부하 범위에 걸친 프로토타입 효율 및 THD.

토템 폴 PFC에 대한 고효율, 낮은 THD 달성

ZVD 신호를 사용하여 토템 폴 PFC 컨버터의 작동 주파수를 제어하여 고효율의 낮은 THD를 달성할 수 있습니다. 이 접근 방식과 시스템에 대한 시뮬레이션 모델에 대한 자세한 내용은 [가변 주파수, ZVS, 5kW, GaN 기반, 2상 토템폴 PFC 레퍼런스 설계](#)를 참조하십시오.

관련 콘텐츠

- 전원 팁 #114: 펌웨어 오류가 발생할 경우 컨트롤이 불안정해질 수 있음
- 전원 팁 #113: 8W 이하의 간단한 절연 전원 옵션 2가지
- 전원 팁 #112: 결합 테스트를 위한 온보드 기구
- 전원 팁 #111: 협업 모바일 로봇에 전류 감지가 필요한 이유
- PFC 토렘 폴 아키텍처와 GaN이 결합되어 높은 전력과 효율성 제공
- 효율적인 전력 변환을 위한 GaN 트랜지스터: 벽 컨버터

참고 자료

1. Fernandes, Ryan 및 Olivier Trescases. “디지털 피크 전류 변조 기능을 갖춘 멀티모드 1MHz PFC 프론트 엔드.” 발행: IEEE Transactions on Power Electronics 31, no. 8 (2016년 8월): pp. 5694-5708. doi: 10.1109/TPEL.2015.2499194.
2. Lim, Shu Fan 및 Ashwin M. Khambadkone. “경부하에서 더 높은 효율과 역률을 제공하는 부스트 PFC를 위한 멀티모드 디지털 제어 방식.” 발행: 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Feb. 5-9, 2012, pp. 291-298. doi: 10.1109/APEC.2012.6165833.
3. Rothmund, Daniel, Dominik Bortis, Jonas Huber, Davide Biadene 및 Johann W. Kolar. “중전압 솔리드 스테이트 변압기를 위한 10kV SiC 기반 양방향 소프트 스위칭 단상 AC/DC 컨버터 개념.” 발행: 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2017년 4월 17-20, pp. 1-8. doi: 10.1109/PEDG.2017.7972488.
4. Liu, Zhengyang. 2017. “고주파 전력 변환을 위한 광대역갭 장치의 특성화 및 적용.” Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University. <http://hdl.handle.net/10919/77959>.

이전에 [EDN.com](http://www.edn.com)에 게시됨 .

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.com에서 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