고밀도 GaN 최적화 PFC 컨버터에서 AC 드롭아웃 복구 문제 해결

Brent McDonald
System and Application Engineer
Power Design Services

머리말

데이터 센터 서버 전원 공급 장치의 전력 손실로 인해 엔터테인먼트, 금융 거래, 홈 보안 시스템에 이르는 모든 작업을 중단시킬 수 있습니다. Open Compute Project(OCP)의 V2 전원 셀프 사양과 같은 사양[1] 강력한 AC 드롭아웃 제어 알고리즘을 통해 서버 다운타임을 줄일 필요성을 강조합니다. 또한, 기존의 연속 전도 모드 제어[2-8]에서는 수동 부품을 축소하면서 PFC(역률 보정) 경부하 및 최대 효율을 향상시키기 위한 비용 효율적인 데이터 센터 솔루션의 필요성이 점점 어려워지고 있습니다.

이 문제를 해결하기 위해 TI는 2상 통합 삼각 전류 모드(iTCM) PFC(그림 1) [9]를 사용하는 질화 갈륨(GaN) 기반 고밀도 설계를 개발했습니다. 고주파에서 작동하는 저가형 인덕터를 사용하면 이 설계의 고효율(>99%)과 전력 밀도(120W/in^3)가 가능합니다. 이러한 소형 인덕터는 단 몇 마이크로초의 스위치 온 타임으로 70A 이상의 스위치 전류가 발생할 수 있다는 점에서 AC 드롭아웃 복구에 고유한 문제를 야기합니다. 또한 타이밍이 지연되면 상당한 역전류가 발생하여 PFC 복구가 더욱 악화될 수 있습니다. 전류 수준을 안전한 크기로 유지하고 역전류를 방지하려면 AC 드롭아웃 및 복구 문제에 대한 새로운 솔루션을 개발할 필요가 있었습니다. 이 문서에서는 표 1에서 주요 부품 및 시스템 사양을 나열하는 가변 주파수, ZVS, 5kW, GaN 기반, 2상 토템 폴 PFC 레퍼런스 설계[10]를 기반으로 하는 랩 검증 데이터를 통해 이 솔루션에 대해 설명합니다.

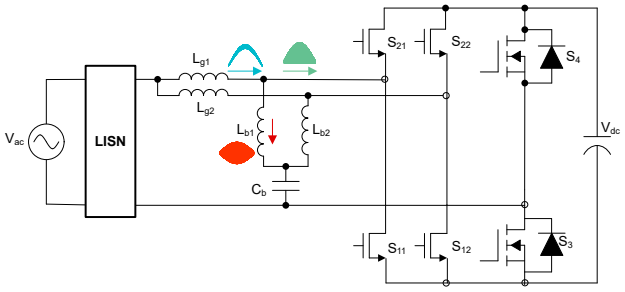

그림 1. 인덕터 및 전류 엔벨로프가 포함된 iTCM 토폴로지.

매개 변수	값
AC 입력	90V~264V
라인 주파수	50~60Hz
DC 출력	400 V
최대 전력	5 kW
최대 부하 시 대기 시간	20 ms
L_g, 저주파 인덕터	140µH
L_b, 고주파 인덕터	14µH
C_b, 고주파 차단 커패시터	1.5µF
총 고조파 왜곡(THD)	OCP v3
EMI(전자기 간섭)	유럽 표준(EN) 55022 클래스 A
작동 주파수	가변, 75kHz~1.2MHz
마이크로컨트롤러	TMS320F280049C[11]
고주파 GaN 전계 효과 트랜지스터(FET) (S_{11}, S_{12}, S_{22}, S_{21})	LMG3526R030[12]
고주파 실리콘 FET(S_3, S_4)	IPT60R022S7XTMA1
규격	38mm ´ 65mm ´ 263mm
전력 밀도	120 W/in^3

표 1. 인덕터 및 전류 엔벨로프가 포함된 iTCM 토폴로지.

토폴로지 개요

이 토폴로지는 단일 DC 차단 커패시터 C_b로 위상에서 180°로 작동하는 2상을사용하며, 2상 아키텍처에서 제공하는 리플 전류 취소를 활용하고 C_b의 RMS(루트 평균 제곱) 전류 스트레스를 줄입니다. L_{b1} 및 L_{b2}는 TCM 작동에 필요한 고주파 AC 리플 전류를 처리할 수 있도록 크기가 조정되어 [5]에 정의된 대로 TCM에 사용되는 인덕터에 필

요한 DC 바이어스 부담을 제거합니다. L_{b1} 및 L_{b2}용 페라이트 코어를 사용하면 제로 전압 스위칭(ZVS)에 필요한 높은 플럭스 스윙이 있는 상태에서 낮은 손실이 보장됩니다. L_{g1} 및 L_{g2}는 L_{b1} 및 L_{b2}보다 값이 커서(약 10배 더 큼) 대부분의 고주파 전류가 입력 소스로 유입되는 것을 방지하고 결과적으로 EMI를 개선합니다. 또한 L_{g1} 및 L_{g2}에서 리플 전류가 감소하여 저렴한 코어 물질을 사용할 수 있습니다. **그림 1**에는 또한 인덕터 및 스위치 노드의 리플 전류 엔벨로프가 나와 있습니다.

AC 손실 기술 과제

첫 번째 과제는 AC 입력 전압이 사라질 때의 역전류 생성입니다. 토템 폴 PFC 토폴로지의 모든 스위치는 양방향이므로 AC를 제거할 때 동기 정류기로 작동하는 FET가 가능한 한 빨리 꺼져야 합니다. 이 차단 기능은 출력 전압을 방전시키고 사용 가능한 홀드업 시간을 감소시키는 음의 전류가 생성되는 것을 방지합니다. **그림 2**은 양극 하프 사이클 중에 동기 전도 간격에 대해 이 음극 전류를 생성하는 경로를 보여줍니다. 또한 동기 정류기를 끄는 데 상당한 지연이 있을 경우 과전류 보호(OCP)를 활성화할 수 있는 큰 전류 스파이크가 발생할 수 있습니다. 예를 들어 입력 전압이 존재하지 않을 때 동기 정류기가 계속 켜져 있으면 문제를 해결할 수 있습니다 $V_{dc} = L_{b1} \cdot \frac{dI_1}{dt}$ - 70A의 전류를 생성하는 데 걸리는 시간, 즉 2.5µs로 계산합니다. 이 짧은 시간은 시스템이 OCP에 도달하거나 손상을 유발하기 전에 문제를 식별하고 스위칭을 중지하기 위한 AC 드롭아웃 감지에 중요한 문제를 나타냅니다.

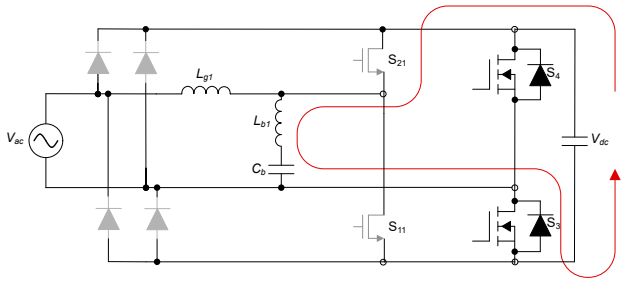

***그림 2.** 동기 정류기 S_{21} 지연 턴오프 V_{dc} 방전 경로.*

두 번째 문제는 AC 복원 후 PFC 작동을 재개하는 것입니다. 이 이벤트의 중심 문제는 PFC의 바이패스 다이오드가 입력 사인파의 피크로 출력 전압을 충전하기 때문에 출력 전압이 이 피크 값 이하로 떨어질 때 고압선에서 가장 쉽게 발생합니다. 이러한 이벤트 동안 컨버터는 전류를 중지하는 메커니즘이 없어 서지 전류가 매우 큽니다. 이러한 이벤트 동안 스위치를 잘못 제어하면 인덕터의 포화, OCP 이벤트 생성 및 출력 전압을 추가로 방전하여 훨씬 더 악화시킬 수 있습니다. 이 시간 동안 정밀한 제어 알고리즘의 필요성은 다시 L_{b1} 및 L_{b2}에 사용되는 작은 값의 인덕터와 함께 iTCM 토폴로지의 고주파 작동 지점에 의해 배가됩니다.

AC 드롭아웃 솔루션

AC 입력의 유무를 정확하게 판단하기 위해 이 솔루션은 실제 AC 입력의 무결성을 모니터링하는 가상 AC 입력 신호를 사용합니다. 이 가상 신호는 입력 전압 진폭, 주파수 및 위상을 측정하여 생성되므로 정상 작동 중에 실제 AC 입력의 50 및 60Hz 성분을 거의 완벽하게 추적합니다. 시스템은 실제 입력을 가상 입력과 비교하여 AC 입력 전압의 유무를 쉽게 인식할 수 있습니다. 이러한 두 신호 사이의 차이가 갑자기 변경되면 입력 과도 현상이 나타납니다. 이 과도 이벤트는 AC 입력 전압의 손실과 복원을 모두 감지하는 데 사용됩니다. **그림 3**에는 가상 AC 입력과 드롭아웃 이벤트 중 실제 입력이 나와 있습니다.

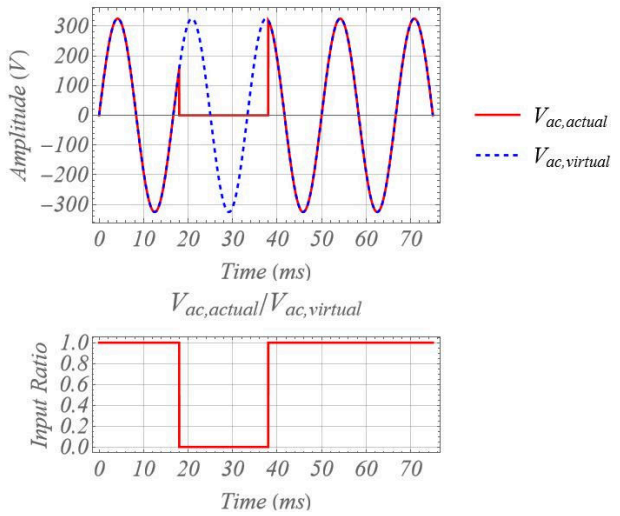

***그림 3.** 가상 AC 신호를 통한 AC 입력 손실.*

그림 4에는 드롭아웃 및 복원 프로세스를 제어하는 상태 시스템이 나와 있습니다. 시작 시 시스템은 초기화 사이클(Sync Init)을 거쳐 RMS 입력 전압 규모를 결정합니다. 이는 소프트웨어 위상 동기도 루프(SPLL)를 사용하여 $V_{ac,virtual}$의 위상이 $V_{ac,actual}$과 일치하도록 합니다. SPLL이 잠기면(동기화 켜짐) 프로세서는 $V_{ac,actual}/V_{ac,virtual}$ 간의 비

율을 모니터링합니다(그림 3 참조). 이 비율이 목표 임계값보다 작으면 손실 이벤트가 선언되고 즉시 전환이 중지됩니다(중지 상태). 여기서부터 시스템은 발생한 모든 오류를 지우고 대기 상태(준비)로 전환하여 $V_{ac,actual}/V_{ac,virtual}$ 비율을 모니터링하여 재개 임계값을 초과하는 시점을 결정합니다. 상태 시스템에서 AC가 복원된 것으로 확인되면 즉시 전환을 재개하고 SPLL(Resume State)을 다시 동기화합니다. 알고리즘은 SPLL과 함께 $V_{ac,actual}/V_{ac,virtual}$ 비율을 사용하여 모든 입력 전압 또는 주파수에 대한 AC 드롭아웃 및 복원 시간을 결정할 수 있습니다. 또한 알고리즘이 항상 $V_{ac,actual}/V_{ac,virtual}$, 비율을 모니터링하기 때문에 AC 입력 전압이 0이 되는 시점을 감지하는 기존의 레벨 기반 솔루션보다 더 빠르게 대응할 수 있습니다. 드롭아웃에 대한 레벨 기반의 모니터링은 지연을 생성할 수 있어 큰 전류 스파이크와 상당한 역전류를 초래할 수 있습니다.

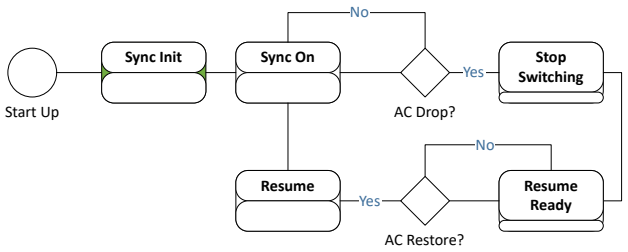

그림 4. AC 드롭아웃 및 복원 상태 시스템.

결과

그림 5은 AC 드롭아웃 및 복원 이벤트 중에 앞서 언급한 알고리즘과 2상 iTCM 토템 폴 PFC의 성능을 보여줍니다. AC 입력 전압은 60Hz에서 $230V_{RMS}$이고 출력 전압은 400V입니다. 부하는 20ms AC 손실 이벤트인 5kW(400V, 125A)의 정전류입니다. 시스템에 최악의 스트레스를 발생시키기 위해 AC 라인 사이클의 피크 시점에 복귀하도록 AC를 제거했습니다. 이는 입력 바이패스 다이오드가 AC 라인 피크가 V_{OUT}을 초과할 때 출력 커패시터에 상당한 돌입 전류를 발생시킨다는 점에서 돌입 전류에 있어 최악의 경우입니다.

그림 5의 파형은 이벤트의 복구 부분에서 확대된 이미지를 제공합니다. PFC 스위치 전류가 잘 제어되고 GaN FET OCP 한계[12]보다 낮다는 것을 명확하게 확인할 수 있습니다. 역전류를 최소화하여 V_{OUT}의 불필요한 방전을 방지합니다. 또한, 입력 전압이 출력 전압보다 높은지 아니면 같은지 쉽게 확인할 수 있기에 바이패스 다이오드 전도 간격의 비정상적인 동작이 없습니다.

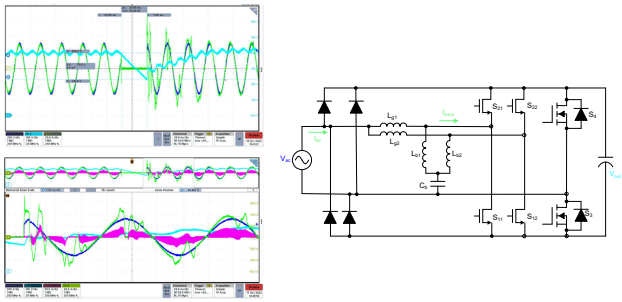

그림 5. 5kW에서 AC 드롭아웃 및 복원 성능.

이 설계는 AC 드롭아웃 외에도 낮은 THD, 높은 효율, 높은 전력 밀도 및 빠른 부하 과도 응답을 제공합니다.

이 알고리즘이나 이 설계의 다른 측면에 대한 자세한 내용은 참조 [10] 에서 2상 토템 폴 PFC 레퍼런스 설계에 대한 전체 회로도, 레이아웃, 재료 사양서, 테스트 결과 및 코드를 찾을 수 있습니다.

참고 자료

1. **V2 전원 셸프 사양 6600W @ 12.6V DC (2 + 1) 중복**. OPEN Compute Project. 페이스북: Menlo Park, California, 2015년 2월.
2. 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.
3. 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), pp. 291-298. doi: 10.1109/APEC.2012.6165833.
4. Huang, Long, Wenxi Yao 및 Zhengyu Lu. **ZVS 및 낮은 입력 전류 리플을 지원하는 인터리브 토템 폴 브리지리스 PFC 정류기**. 발행: 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 166-171. doi: 10.1109/ECCE.2015.7309684.

5. Liu, Zhengyang. 2017. **고주파 전력 변환을 위한 광대역갭 장치의 특성화 및 적용**. Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
6. Kim, J.W., S.M. Choi, and K.T. Kim. **제로 크로싱 왜곡을 개선하기 위한 중요 전도 모드 부스트 역률 보정 컨버터의 가변 온 타임 제어**. 발행: 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems, pp. 1542-1546. doi: 10.1109/PEDS.2005.1619933.
7. Xu, Xiaojun 및 Alex Q. Huang. **다중 위상 임계 모드 부스트 PFC 컨버터의 새로운 폐쇄형 루프 인터리브 전략**. 발행: 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 1033-1038. doi: 10.1109/APEC.2008.4522849.
8. Neumayr, D., D. Bortis, E. Hatipoglu, J.W. Kolar 및 G. Deboy. **새로운 효율성 - 고전력 밀도 DC/AC 컨버터 시스템을 위한 최적의 주파수 변조**. 발행: 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia), pp. 834-839. doi: 10.1109/IFEEC.2017.7992148.
9. Rothmund, Daniel, Dominik Bortis, Jonas Huber, Davide Biadene 및 Johann W. Kolar. **중전압 솔리드 스테이트 변압기를 위한 10 kV SiC 기반 양방향 소프트 스위칭 단상 AC/DC 컨버터 개념**. 발행: 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), pp. 1-8. doi: 10.1109/PEDG.2017.7972488.
10. Texas Instruments. n.d. **가변 주파수, ZVS, 5kW, GaN 기반, 2상 토템 폴 PFC 레퍼런스 설계**. 텍사스 인스트루먼트 레퍼런스 설계 번호 PMP40988. 2022년 12월 27일 액세스함.
11. Texas Instruments. n.d. **C2000™ 32비트 MCU - 100MHz, FPU, TMU, 256KB 플래시, CLA, InstaSPIN-FOC, CLB, PGA, SDFM**. 2022년 12월 27일 액세스함.
12. Texas Instruments. n.d. **통합 드라이버, 보호 및 온도 보고 기능이 있는 오토모티브 650V 30mΩ GaN FETg**. 2022년 12월 27일 액세스함.

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.

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

© 2023 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 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