

## Technical Article

## ESS의 양방향 CLLLC 공진 컨버터 제어 체계



Guangzhi Cui

## 머리말

양방향 CLLLC(커패시터-인덕터-인덕터-인덕터-커패시터) 등의 단일 단계 절연 컨버터는 시스템 비용을 절약하고 전력 밀도를 개선하기 위해 ESS(에너지 저장 시스템)에서 널리 사용되는 컨버터 유형입니다. CLLLC의 게인 곡선은 더 평평하지만, 스위칭 주파수( $f_s$ )가 직렬 공진 주파수( $f_r$ )보다 높을 때는 게인 곡선이 원치 않는 수준으로 평평해집니다. 또한 변압기 및 MOSFET의 기생 커패시턴스가 컨버터 게인에 커다란 영향을 줍니다[1]. 이로 인해 컨버터의 출력 전압이 조정 상태를 벗어납니다. 이 전원 팁에서는 성능 검증을 위해 3.6kW 프로토타입 컨버터를 사용하여 이 비선형성을 제거하는 CLLLC 제어 알고리즘 및 SR(동기식 정류기) 제어 방법을 소개합니다. 그림 1은(는) 가정용 ESS의 블록 다이어그램입니다.

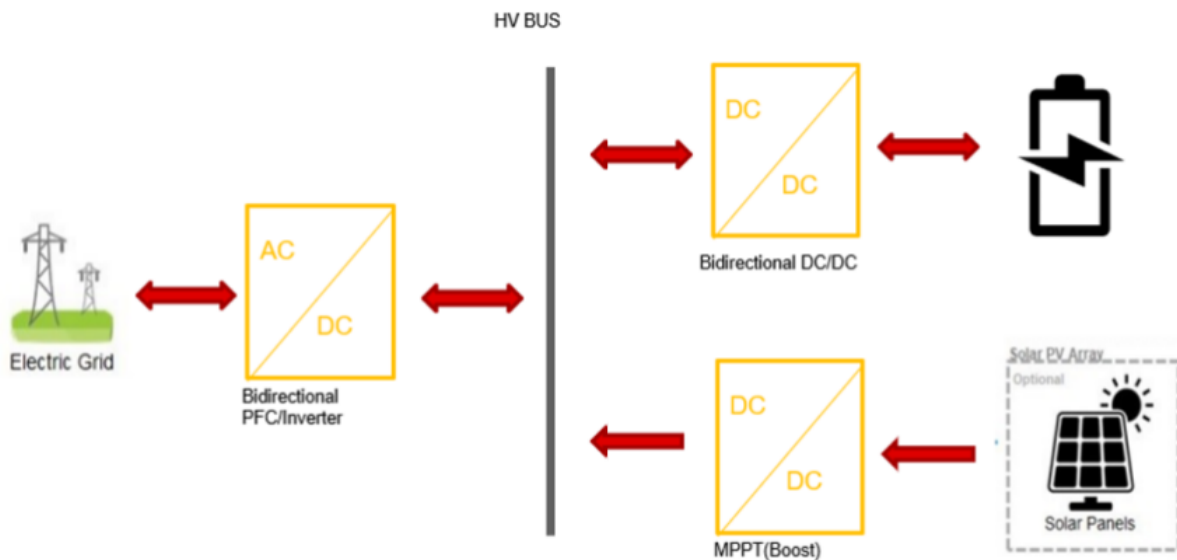


그림 1. 양방향 PFC(역률 보정)/인버터, 양방향 DC/DC 컨버터 및 MPPT(최대 전력 지점 추적) 기능이 포함된 가정용 ESS 블록 다이어그램. 출처: 텍사스 인스트루먼트

## 제어 단계의 설계 고려 사항

그림 2에서는 기생 커패시터가 있는 풀 브리지 CLLLC 공진 컨버터의 회로 토폴로지입니다. 이 토폴로지는 대칭형 공진 탱크와 풀 브리지 구조로 구성됩니다.

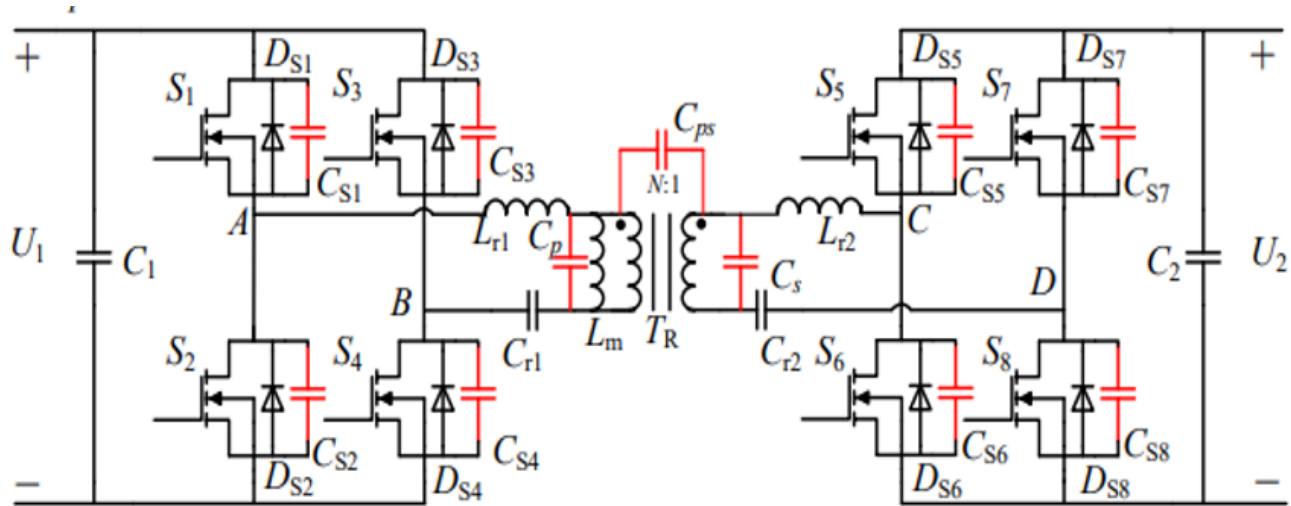


그림 2. 기생 커패시터가 있는 풀 브리지 CLLLC 컨버터의 회로 토폴로지. 출처: 텍사스 인스트루먼트

그림 3에서는 CLLLC의 이상적인 게인 곡선을 보여줍니다. LLC 컨버터와 유사하게 가변 주파수 제어는 CLLLC 공진 컨버터에 널리 사용되는 제어 체계입니다.

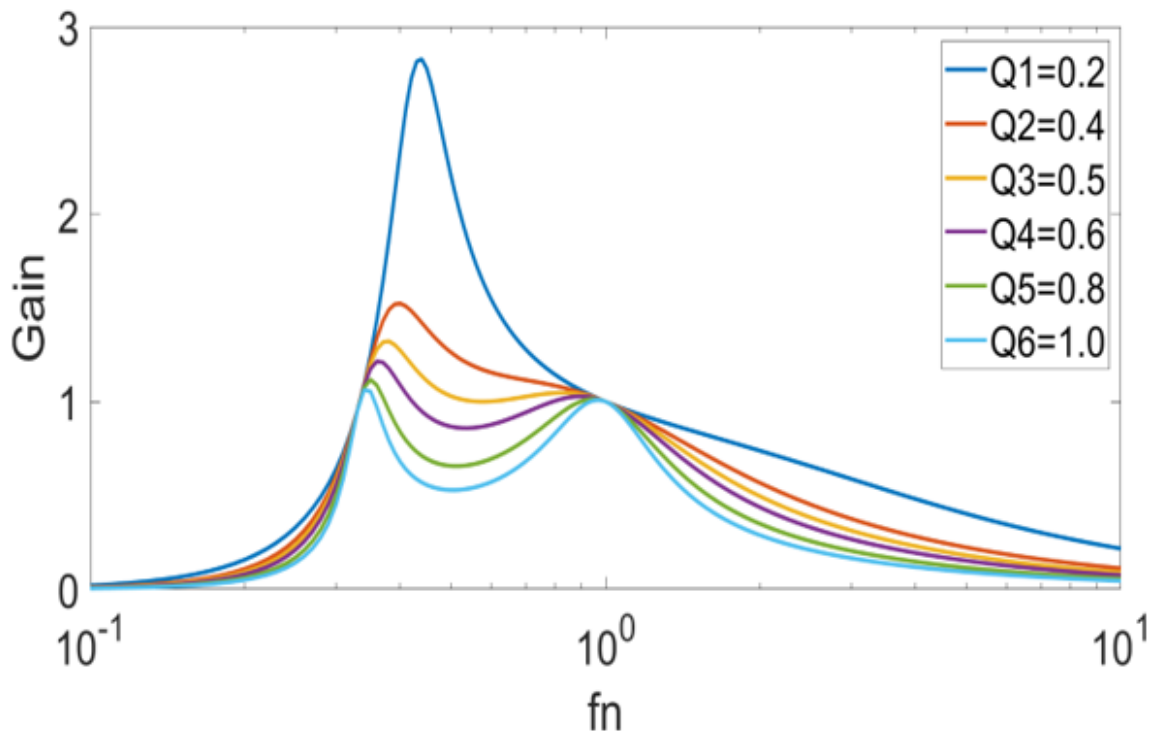


그림 3. 가변 주파수 제어를 사용하는 이상적인 CLLLC 게인 곡선. 출처: 텍사스 인스트루먼트

앞서 언급했듯이  $f_s$ 가  $f_r$ 를 초과하면 게인 곡선이 평평해집니다. 게다가 전력 레벨이 상승하면 더 많은 전류를 처리하기 위해 컨버터가 배터리 측에서 더 많은 FET를 병렬로 필요로 합니다. 즉, 출력 풀 브리지 FET의 출력 커패시턴스( $C_{oss}$ )가 매우 커 집니다. 변압기 권선 내 커패시턴스와  $C_{oss}$ 의 기생 커패시턴스를 고려하면 고주파에서의 비단조성 게인 곡선이 상당히 커지며 그림 4에 표시된 것처럼 경부하 상태에 해당합니다.

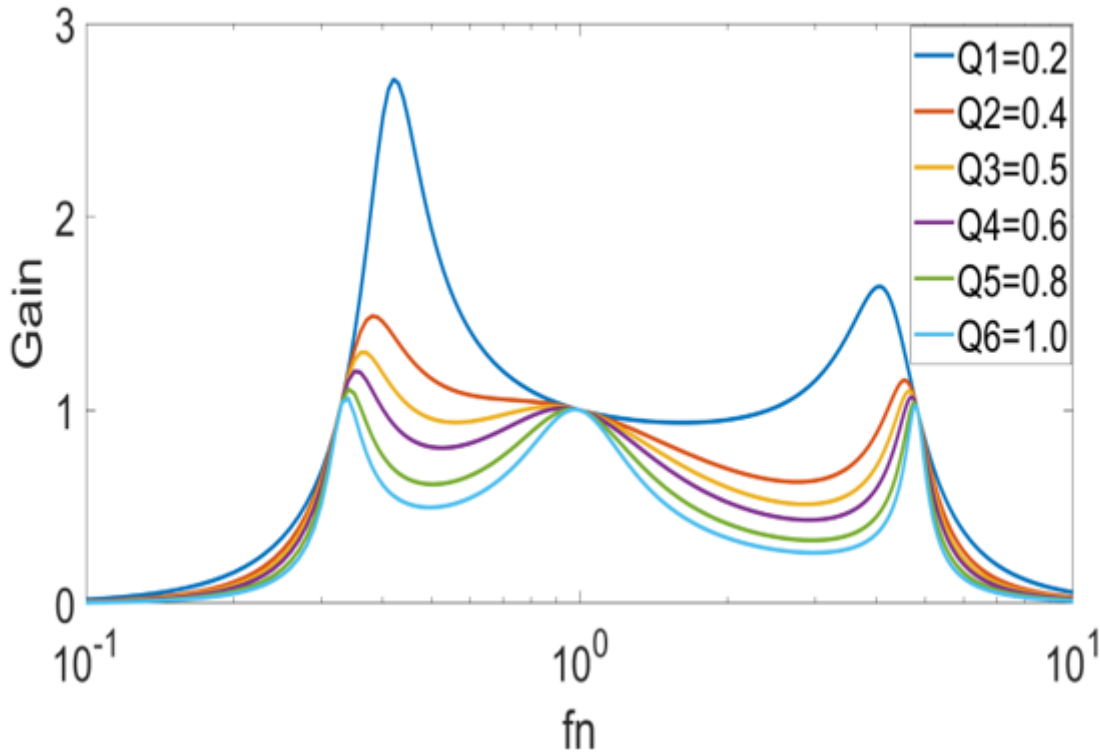


그림 4. 변압기 권선 내 커패시턴스 및  $C_{oss}$  등의 기생 매개 변수를 고려한 CLLLC 게인 곡선. 출처: 텍사스 인스트루먼트

이 경우 주파수 제어는 효과가 없습니다. 히킵 모드는 CLLLC 공진 컨버터 비단조 특징을 해결하기 위해 널리 사용되는 방법이지만, 배터리 전압이 낮을 때 컨버터가 고전류를 공급해야 하므로 배터리 애플리케이션에서는 적합하지 않습니다. PWM(펄스 폭 변조) 및 위상 변이 제어로 이 문제를 해결할 수 있지만, PWM 제어의 경우 트랜지스터가 하드 스위칭 상태에서 작동하게 되므로 효율이 떨어지고 작동 주파수가 제한적입니다. 따라서 위상 변이 제어가 더 나은 선택입니다.

## 제어 로직

그림 5에서는 주파수와 위상 변이 혼합 제어 체계 다이어그램을 보여줍니다. 배터리 전압은 시동 중에 낮기 때문에, 컨버터는 높은 전류 스파이크를 제한하고 배터리 수명을 연장하기 위해 낮은 충전 전류로 소프트 시동되어야 합니다. 공진 인덕터 값 또는 주파수가 충분히 높지 않으면 고주파에서의 소프트 스타트에 대한 효과가 제한적입니다. 배터리가 거의 최대 용량으로 충전되면 적은 전류로 세류 충전되고 일정한 전압을 유지합니다. 두 경우 모두 컨버터의 경부하 상태에 해당합니다. 경부하에서는 기생 커패시턴스로 인해 출력 전압이 상승하는 경향이 있으며 이전 분석에 따라 결국에는 조정 상태에서 벗어날 수 있습니다. 이 상태에서는 위상 변이 제어가 출력 전압을 조정하는 데 도움이 될 수 있습니다. 컨트롤러의 계산 결과로 컨버터가 위상 변이 모드로 전환되어야 하는지 결정됩니다.

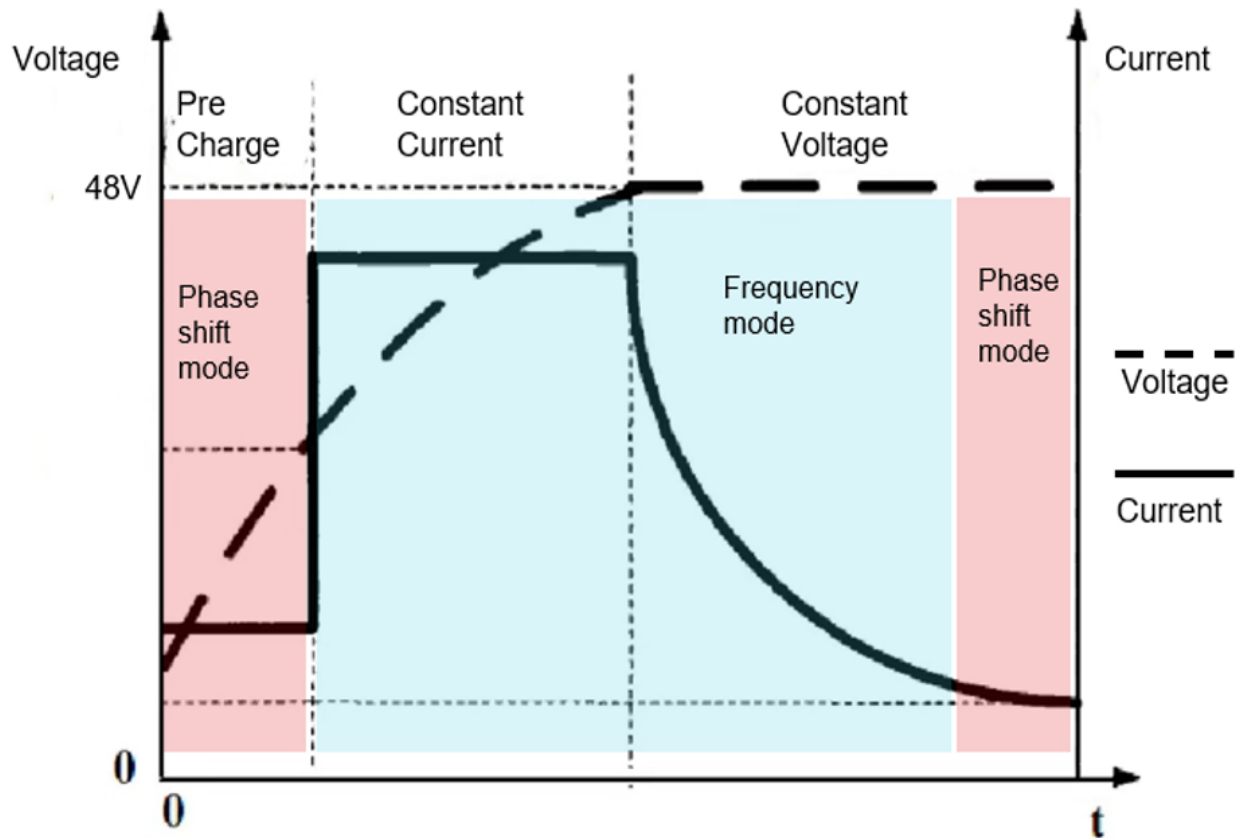


그림 5. 여러 충전 상태의 제어 체계. 배터리 전압은 시동 중에 낮기 때문에, 컨버터는 높은 전류 스파이크를 제한하고 배터리 수명을 연장하기 위해 낮은 충전 전류로 소프트 시동되어야 한다는 점에 유의하세요. 출처: 텍사스 인스트루먼트

그림 6에서는 주파수와 위상 변이 간의 변조 스위칭을 보여줍니다. 부하가 감소하면 주파수가 높아져 출력 전압을 조정합니다. 계산된 최대 주파수가 설정값보다 높으면 컨버터가 위상 변이 변조로 전환됩니다. 그런 다음, 부하가 증가하면 출력 전압을 조정하기 위해 위상 변이 각도가 감소합니다. 위상 변이 각도가 제로로 감소되면 컨버터가 다시 주파수 모드로 전환됩니다.

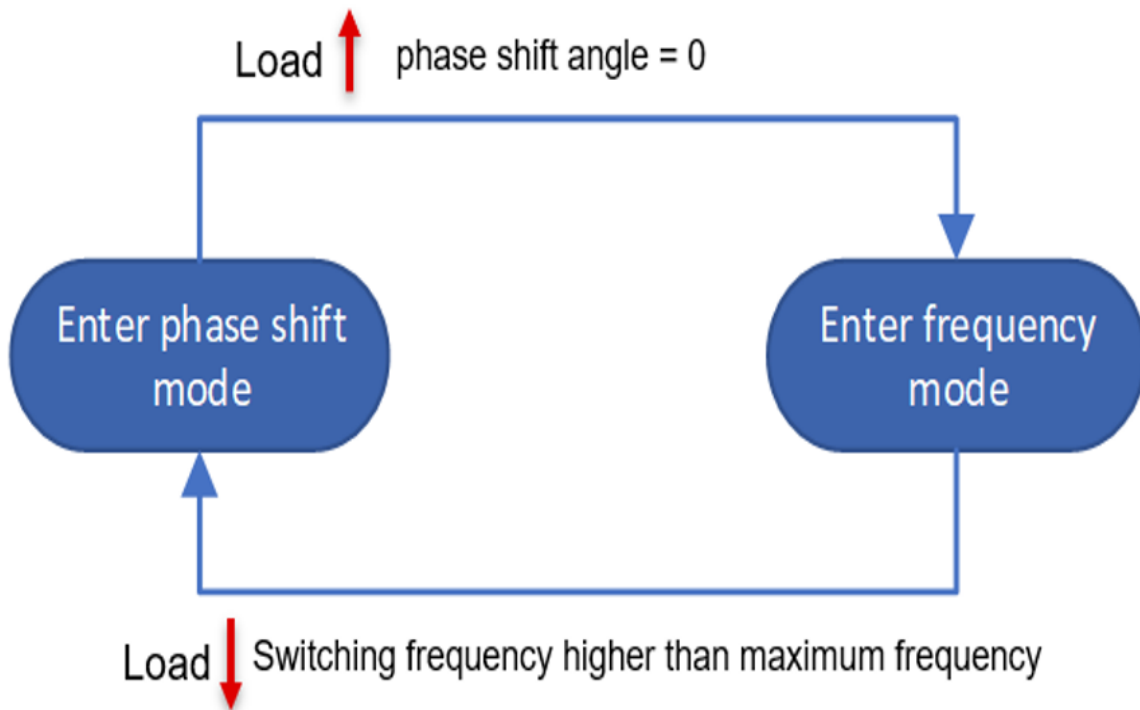


그림 6. 주파수와 위상 변이 모드 간의 제어 체계. 부하가 감소하고 위상 변이 각도가 제로가 되면 주파수가 높아져 출력 전압을 조정합니다(주파수 모드). 최대 주파수가 설정값보다 높으면 위상 변이 각도가 감소하여 출력 전압을 조정합니다(위상 변이 모드). 출처: 텍사스 인스트루먼트

#### 기생 커패시턴스에 의해 유발되는 문제

또한 MOSFET의  $C_{oss}$ 에는 위상 변이 모드에서 다음과 같은 효과가 나타납니다. 그림 7에 표시된 것처럼 이러한 커패시터 사용 시 탱크 전류가 진동합니다.

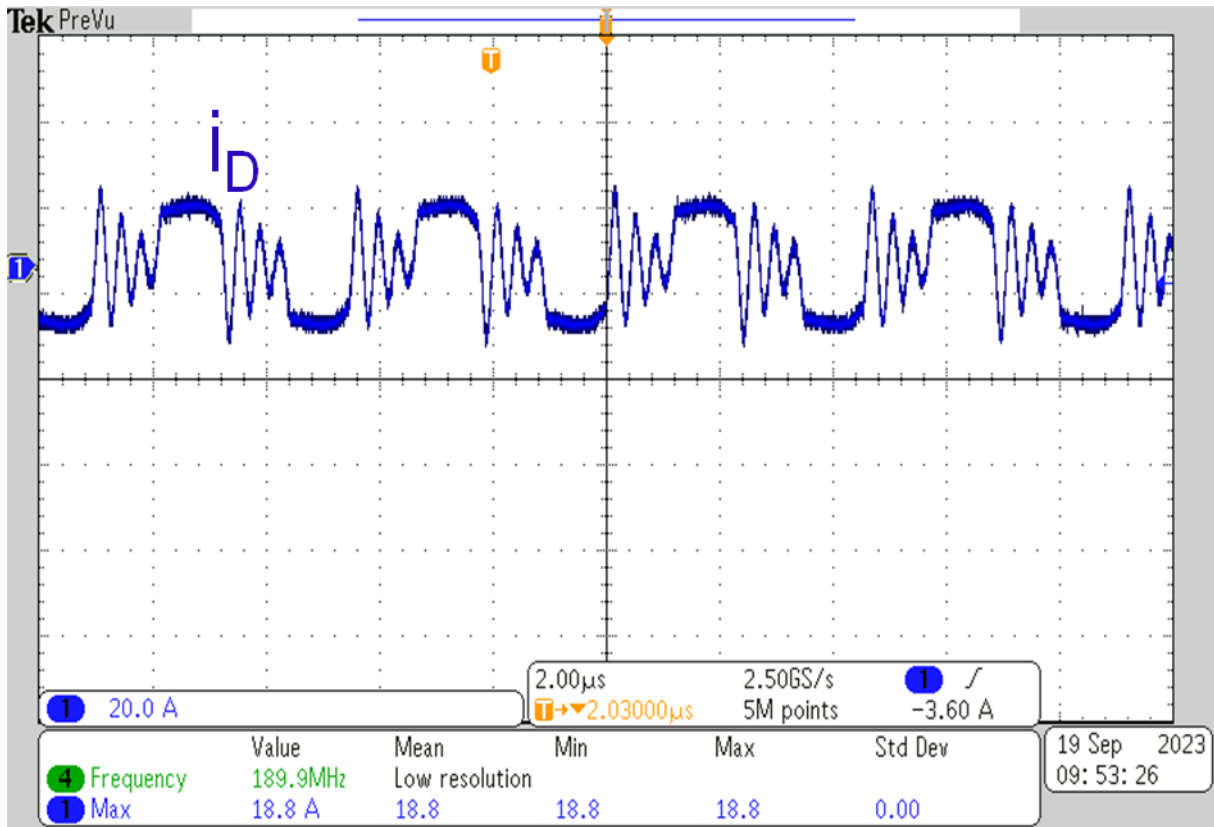


그림 7. 개방형 루프의 위상 변이 모드에서의 탱크 전류 파형. 출처: 텍사스 인스트루먼트

그림 8에서는 MOSFET  $C_{oss}$ 를 고려할 때와 고려하지 않을 때의 CLLC 컨버터 게인 비교를 도표로 보여줍니다. 그림에 따르면 게인 곡선에서 변동이 있습니다. 이 경우 컨트롤러가 폐쇄형 루프 제어에서 위상 변이 각도를 잘못된 방향으로 조정하여 전류 스파이크가 커질 수 있습니다.

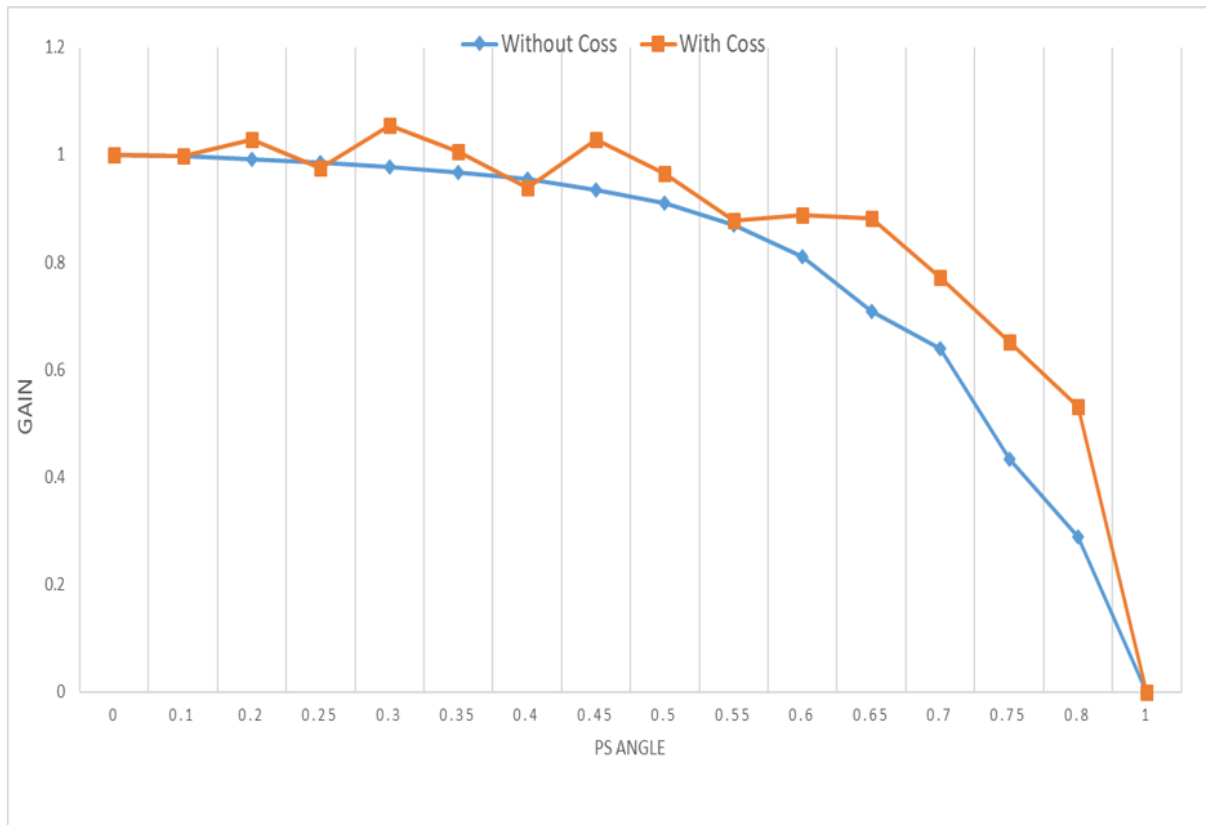


그림 8. 위상 변이 모드에서의  $C_{oss}$  고려 및 미고려 시 게인 곡선. 출처: 텍사스 인스트루먼트

### 게인 문제 해결 방법

게인의 비단조성을 제거하기 위해 그림 9에 표시된 것처럼 SR 제어를 적용하면 이 문제가 해결될 수 있습니다. 탱크 전류 진동 시 두 개의 상위 또는 두 개의 하위 SR 스위치를 동시에 켜면 변압기의 2차측 권선이 일시적으로 단락되어  $C_{oss}$ 가 공진에 관여하지 않게 됩니다.

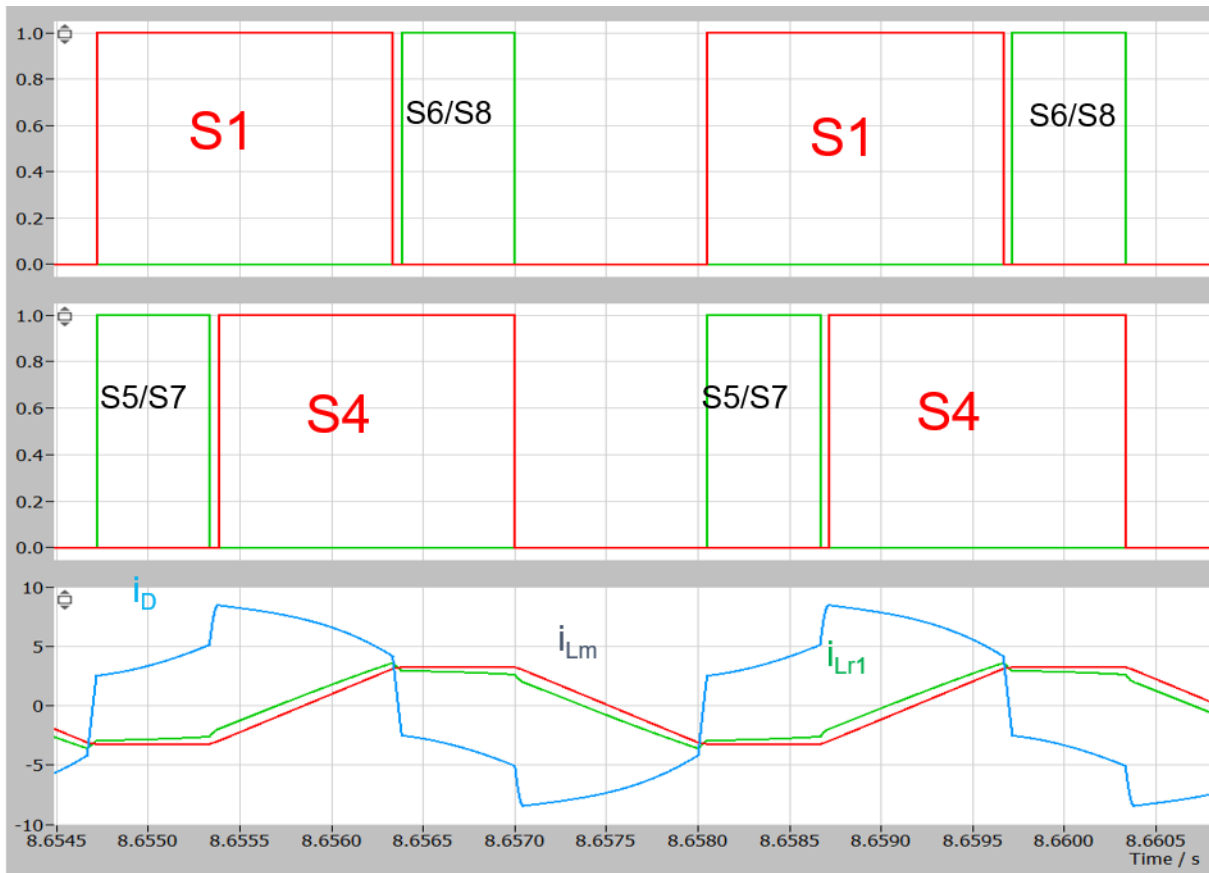


그림 9. 게인의 비단조성을 제거하기 위해 제안된 SR 제어 체계. 출처: 텍사스 인스트루먼트

그림 10에서는 테스트 결과를 보여줍니다. 그림 8과 비교했을 때 진동이 없습니다. 자세한 분석 및 테스트 결과에 대해서는 참조 자료 [2]를 참조하세요.



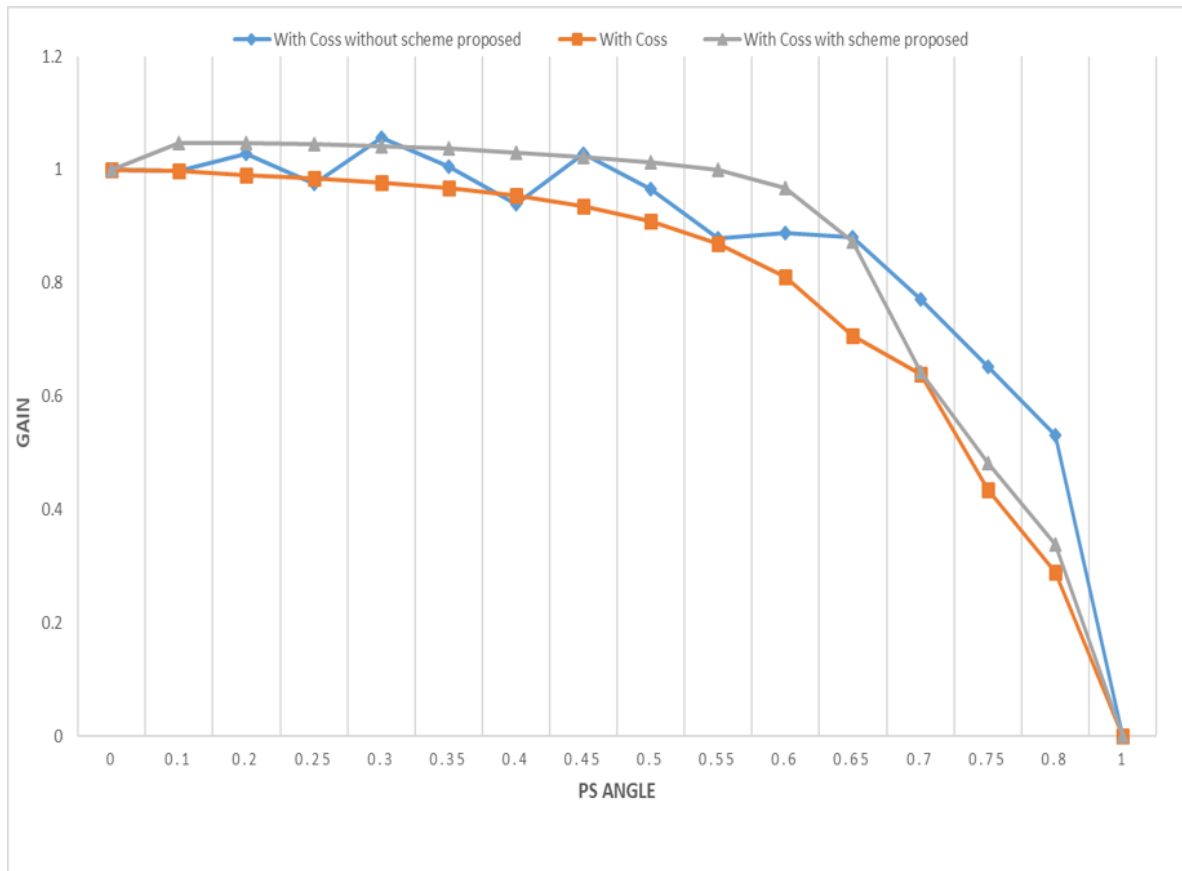


그림 10. 제안된 제어 체계를 사용한 위상 변이 모드에서의 게인 곡선(회색 선). 출처: 텍사스 인스트루먼트

## 실험 결과

프로토타입 [3]에서는 이 제어 체계를 사용하여 성능을 검증합니다. [그림 11](#)에서는 소프트 스타트 파형을 보여주고 [그림 12](#)에서는 제안된 제어 체계를 사용한 위상 변이 모드에서의 탭크 전류 파형을 보여줍니다.

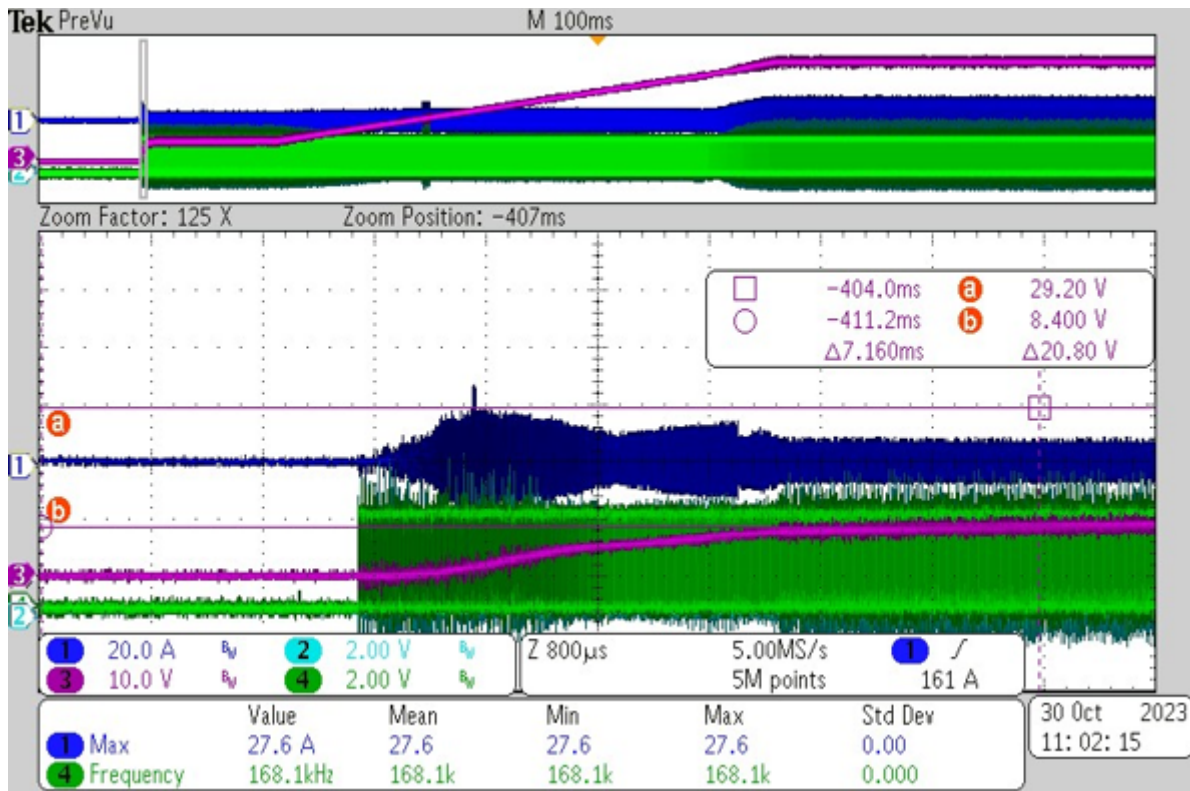


그림 11. 출력 전력이 750W인 위상 변이 소프트 스타트. 출처: 텍사스 인스트루먼트

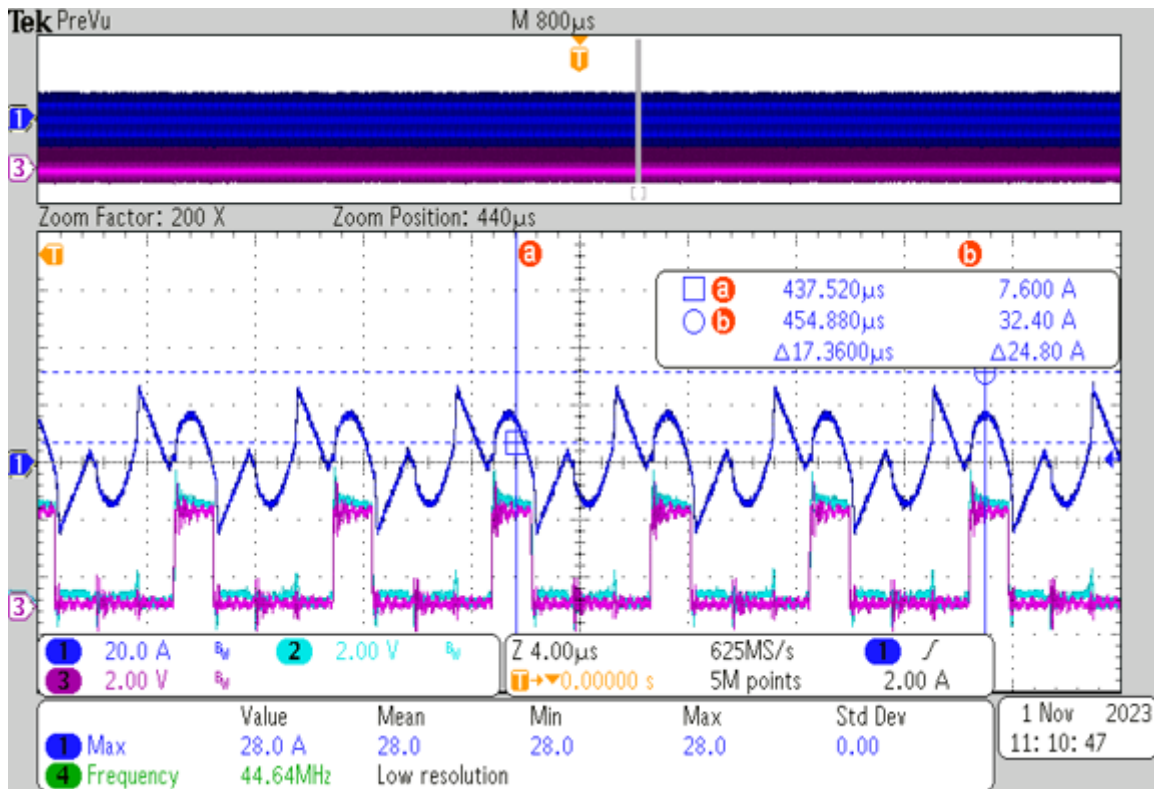


그림 12. 제안된 체계를 사용한 위상 변이 모드에서의 탱크 전류 파형. 출처: 텍사스 인스트루먼트

그림 13 및 그림 14에서는 주파수/위상 변이 변조 스위칭 테스트를 보여줍니다. 테스트 파형에서 시동 전류는 28A 이내로 제한되고 출력 전력은 750W입니다. 탱크 전류에 진동이 없으며 컨버터가 여러 작동 조건에서 변조를 원활하게 변경할 수 있습니다.

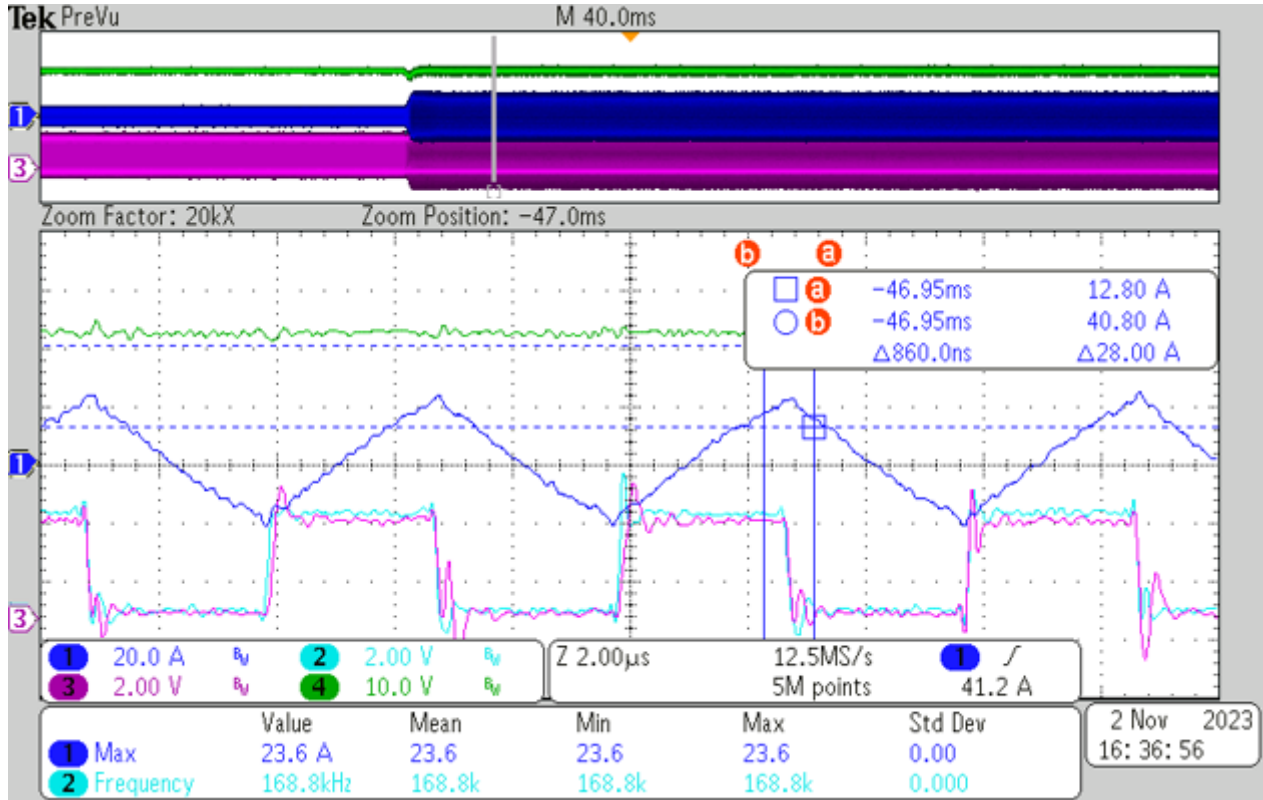


그림 13. 위상 변이 및 주파수 변조 스위칭: 5A 부하의 주파수 모드. 출처: 텍사스 인스트루먼트

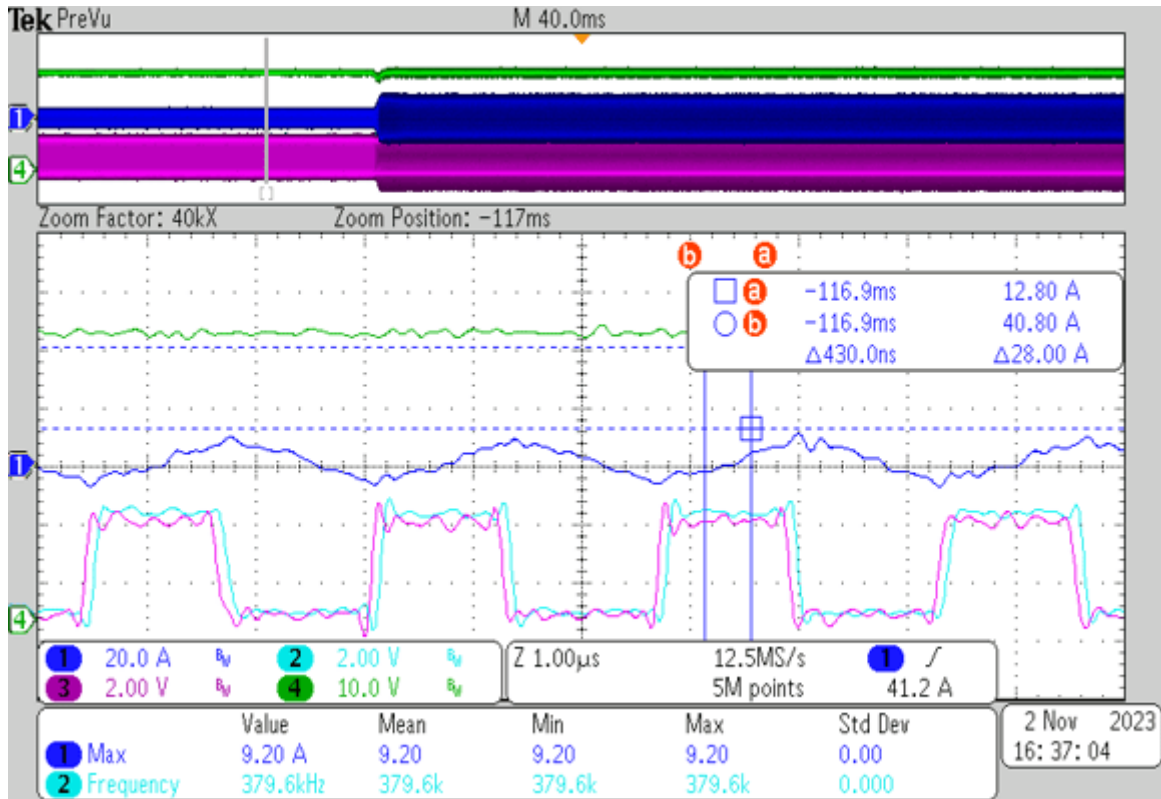


그림 14. 위상 변이 및 주파수 변조 스위칭: 1A 부하의 위상 변이 모드. 출처: 텍사스 인스트루먼트

## 결론

제안된 주파수 및 위상 변이 혼합 제어 체계는 시동 단계에서 돌입 전류를 제한하고 경부하 상태에서 게인을 선형적으로 만들어 줍니다. 컨버터는 주파수 변조 및 위상 변이 변조 간에 원활하게 스위칭할 수 있습니다. 이 외에도 위상 변이 제어는 비단조 게인 문제를 야기하며  $C_{OSS}$ 가 큰 설계에서는 전류가 진동하도록 만듭니다. 제안된 SR 제어 방법을 사용하면 전류 진동 문제를 해결하는 데 도움이 되며 게인이 단조적으로 바뀝니다.

## 관련 콘텐츠

- 전원 팁 #102: EV 온보드 충전기용 CLLLC와 DAB 비교
- 전원 팁 #92: 고주파 공진 컨버터 설계 고려 사항, 2부
- 전원 팁 #134: 어려운 방식으로 전환하지 말고 PWM 풀 브리지를 사용하여 ZVS를 달성
- 전원 팁 #117: 전체 작동 조건에서 테스트하기 전에 LLC 공진 탱크 측정
- 전원 팁 #97: 배터리 충전기 요구 사항을 충족하는 LLC-SRC 게인 곡선 형성
- 전원 팁 #94: 업사이드 다운 벡이 비절연 플라이백의 대체 토폴로지를 제공하는 방식

## 참고 자료

1. Lee, Byoung-Hee, Moon-Young Kim, Chong-Eun Kim, Ki-Bum Park, Gun-Woo Moon, "Analysis of LLC Resonant Converter Considering Effects of Parasitic Components." 계시: INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference, 인천, 대한민국, 2009년 10월 18~22일, 1~6페이지.
2. Tai, Will, Guangzhi Cui, Sheng-Yang Yu, "Gain Optimization Control Method for CLLLC Resonant Converters Under Phase Shift Mode." 계시: PCIM Europe 2024; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 뉘른베르크, 독일, 2024년 6월 11~13일, 2,513~2,518페이지.
3. Cui, Guangzhi. 날짜 정보 없음. "3.6kW 양방향 CLLLC 공진 컨버터 레퍼런스 설계." 텍사스 인스트루먼트 레퍼런스 설계 번호 PMP41042. 2024년 11월 6일에 액세스함.

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 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://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