

## Technical Article

## 높은 스위칭 주파수에서 정류기용 액티브 클램프 회로 설계



Daniel Gao

## 머리말

차량용 전기 시스템에서 고전압-저전압 DC/DC 컨버터는 차량의 고전압(400V 또는 800V) 배터리 DC 전압을 낮은 DC 전압(12V)으로 바꿔주는 가역 전자 장치입니다. 이러한 컨버터는 단방향 또는 양방향일 수 있습니다. 전력 레벨은 일반적으로 1kW에서 3kW이며, 시스템은 컨버터의 고전압 전력망(1차측)에 650V~1,200V 정격, 12V 전력망(2차측)에 최소 60V 정격의 부품을 필요로 합니다.

전력 밀도를 높이고 파워트레인 크기를 줄여야 하기 때문에 자기 부품의 크기를 줄이기 위해 전력 부품의 스위칭 주파수가 수백 킬로헤르츠로 높아졌습니다. 고전압-저전압 DC/DC 컨버터의 소형화는 낮은 스위칭 주파수에서는 그다지 중요하지 않았던 EMC(전자기 적합성), 열 방출, MOSFET(금속 산화막 반도체 전계 효과 트랜지스터)용 액티브 클램프와 같은 많은 문제들을 드러냅니다. 이 전력 텁에서는 높은 스위칭 주파수에서 동기식 정류기 MOSFET용 클램핑 회로의 설계에 관해 논의하고자 합니다.

## 기존 액티브 클램프

그림 1에 표시된 PSFB(위상 변이 풀 브리지)는 스위치에서 소프트 스위칭을 실현하여 컨버터 효율을 높일 수 있기 때문에 고전압-저전압 DC/DC 애플리케이션에서 널리 사용되는 토플로지입니다. 그러나 동기식 정류기의 기생 커패시턴스가 변압기 누설 인덕턴스와 공진하므로, 여전히 동기식 정류기에 고전압 스트레스가 발생할 것으로 예상됩니다. 정류기의 전압 스트레스는 방정식 1에서만큼 높을 수 있습니다.

$$V_{ds\_max} = 2V_{IN}x(N_s/N_p) \quad (1)$$

여기에서  $N_p$ 와  $N_s$ 는 각각 변압기의 1차측 및 2차측 권선입니다.

설계자는 고전압-저전압 DC/DC 컨버터의 전력 레벨과 저항-커패시터-다이오드 스너버의 전력 손실을 감안해 [1] 동기식 정류기 MOSFET에 액티브 클램프 회로를 사용할 때가 많습니다. 그림 1에 일반적인 회로를 표시했습니다.

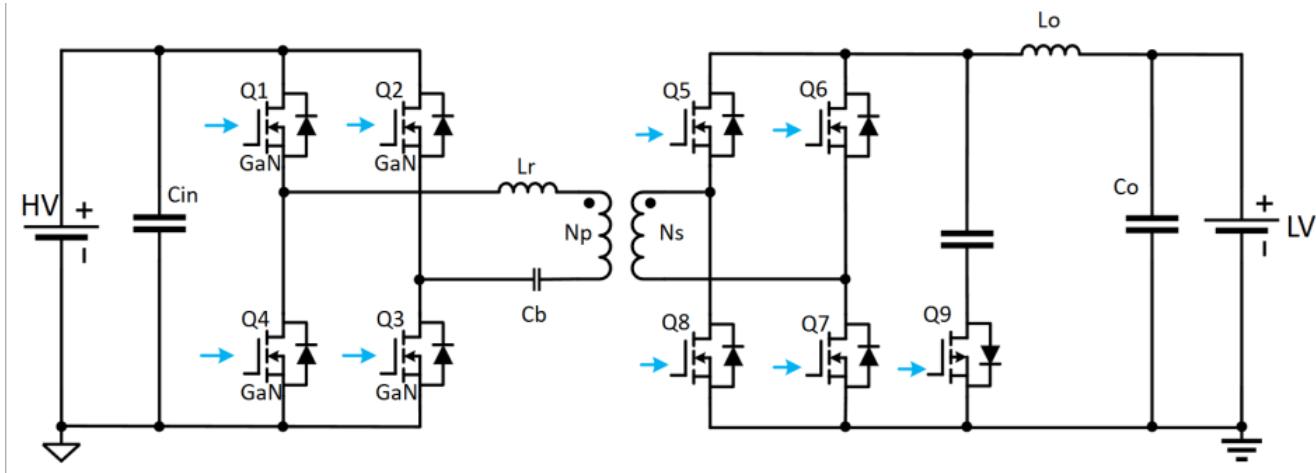


그림 1. PSFB 동기식 정류기 MOSFET의 기존 액티브 클램프 회로. 출처: [테사스 인스트루먼트](#)

이 회로도에 액티브 클램프 회로의 주된 부품인 PMOS(P 채널 금속 산화막 반도체) Q9 및 스너버 커패시터가 표시되어 있습니다. 스너버 커패시터의 단자 한 개는 출력 초크에 연결되고, PMOS의 소스는 접지에 연결됩니다. PSFB용 기존 액티브 클

램프 회로에서는 동기식 정류기 MOSFET Q5 및 Q7의 체계가 동일하며, Q6과 Q8도 마찬가지입니다. 동기식 정류기 MOSFET이 셧다운된 후마다 PMOS는 적절한 지연 시간 후에을 거쳐 커집니다.

그림 2에 PSFB와 액티브 클램프의 제어 체계를 표시했습니다. PMOS의 스위칭 주파수가  $f_{sw}$ 의 두 배가 된다는 사실을 쉽게 확인할 수 있습니다.

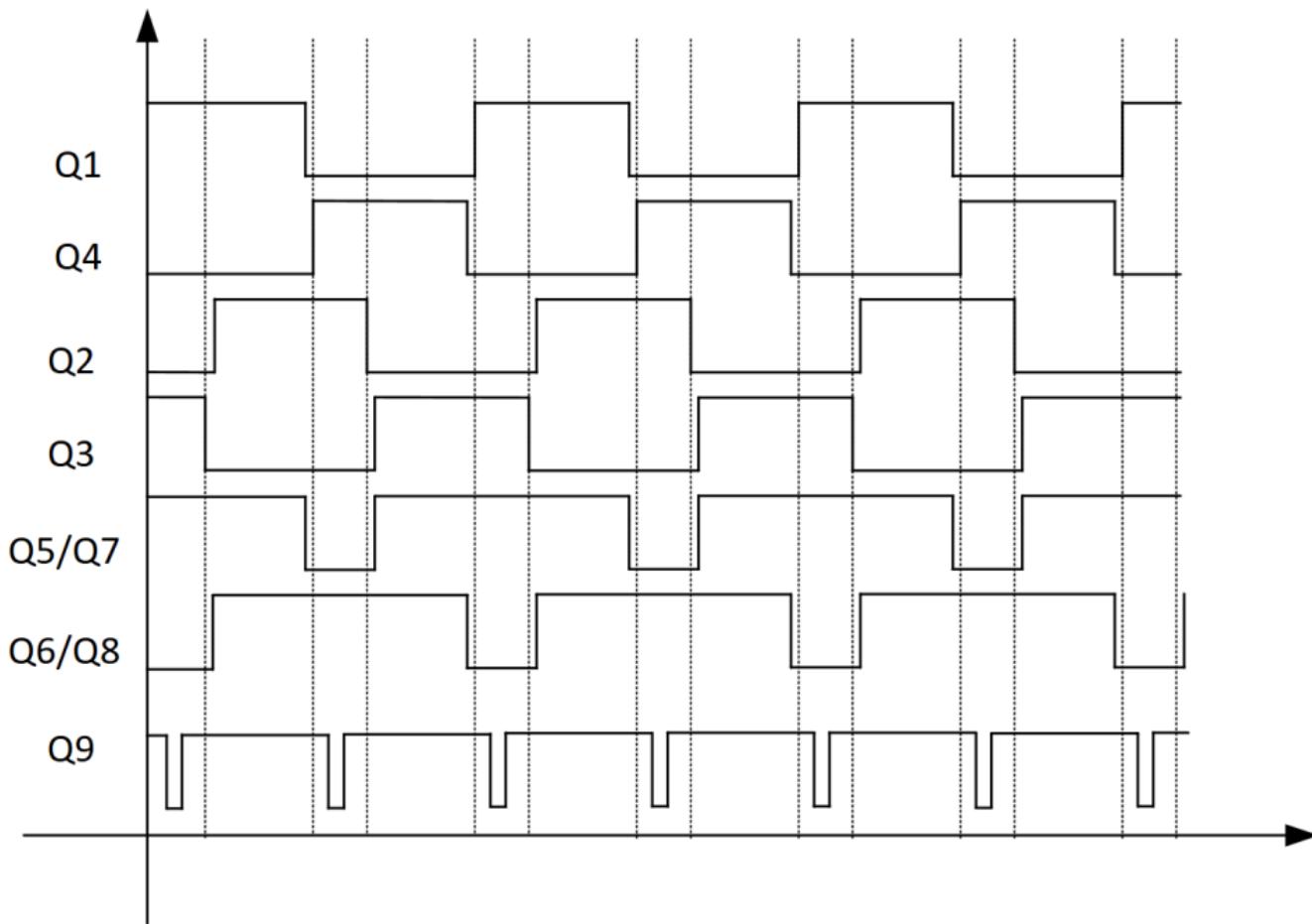


그림 2. PMOS의 스위칭 주파수가  $f_{sw}$ 의 두 배인 액티브 클램프 PMOS Q9의 제어 체계. 출처: 텍사스 인스트루먼트

#### 액티브 클램프 손실 평가

방정식 2, 방정식 3, 방정식 4, 방정식 5, 방정식 6을 사용해 액티브 클램프 PMOS의 손실을 평가할 수 있습니다.  $P_{on\_state}$ 를 제외하고 다른 모든 손실은  $f_{sw}$ 에 비례합니다. PMOS의 스위칭 주파수가 두 배가 되면 손실도 두 배가 되므로, PMOS 열 문제를 해결해야 합니다. 그리고 소형화 요구 사항에 맞추기 위해  $f_{sw}$ 를 높이면 이 열 문제가 더 악화되는 것으로 나타났습니다.

$$P_{on\_state} = I_{rms}^2 \times R_{ds(on)} \quad (2)$$

$$P_{turn\_on} = 0.5 \times V_{ds} \times I_{on} \times t_{on} \times f_{sw} \quad (3)$$

$$P_{turn\_off} = 0.5 \times V_{ds} \times I_{off} \times t_{off} \times f_{sw} \quad (4)$$

$$P_{drive} = V_{drv} \times Q_g \times f_{sw} \quad (5)$$

$$P_{diode} = I_{snubber} \times V_{sd} \times t_d \times f_{sw} \quad (6)$$

## 제안된 액티브 클램프

그렇다면 무엇을 할 수 있을까요? FOM(성능 지수)이 더 나은 PMOS를 선택해야 할까요? 아니면, 전도 계수가 더 높은 열 그리스를 선택해야 할까요? 둘 다 괜찮지만, 액티브 클램프로 인한 열 문제는 여전히 부품 한 개에만 집중되기 때문에 이 문제를 해결하기 어렵다는 점을 유의해야 합니다. 열을 부품 여러 개로 나눌 수 있을까요? 현실적인 방안은, 액티브 클램프를 두 개 사용하고 스너버 커패시터의 단자를 2차 레그의 스위칭 노드에 연결하는 것입니다(그림 3 참조). 이렇게 하면 Q5 및 Q7이 꺼진 뒤에만 Q11을 켜고, Q6 및 Q8이 꺼진 뒤에만 Q10을 켤 수 있습니다. 그림 4에 PSFB의 제어 체계와 제안된 액티브 클램프를 표시했습니다.

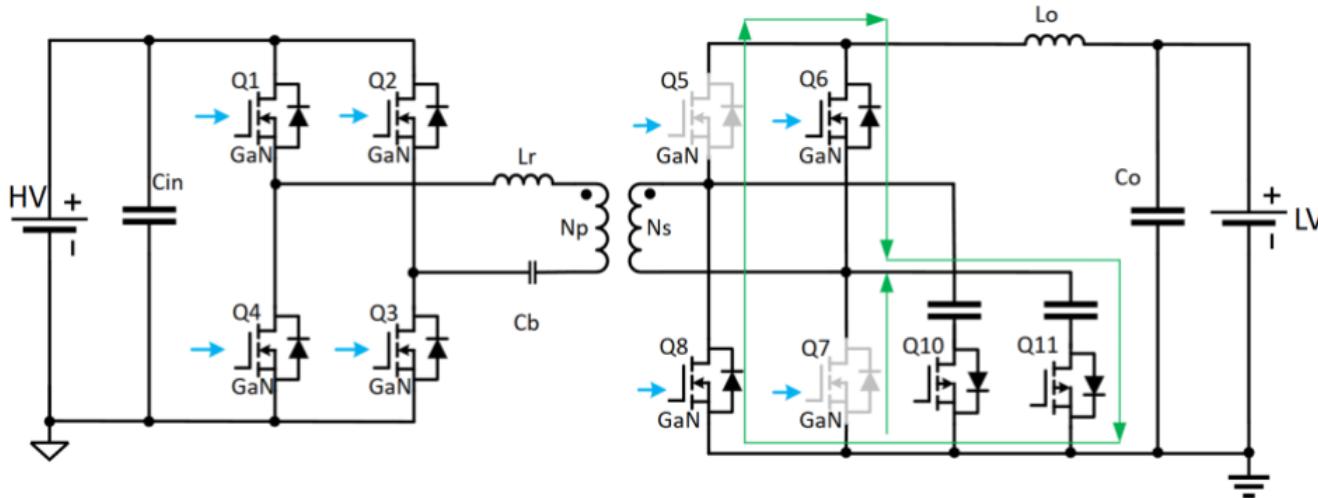


그림 3. PSFB 동기식 정류기 MOSFET에 제안된 액티브 클램프 회로. 출처: 텍사스 인스트루먼트

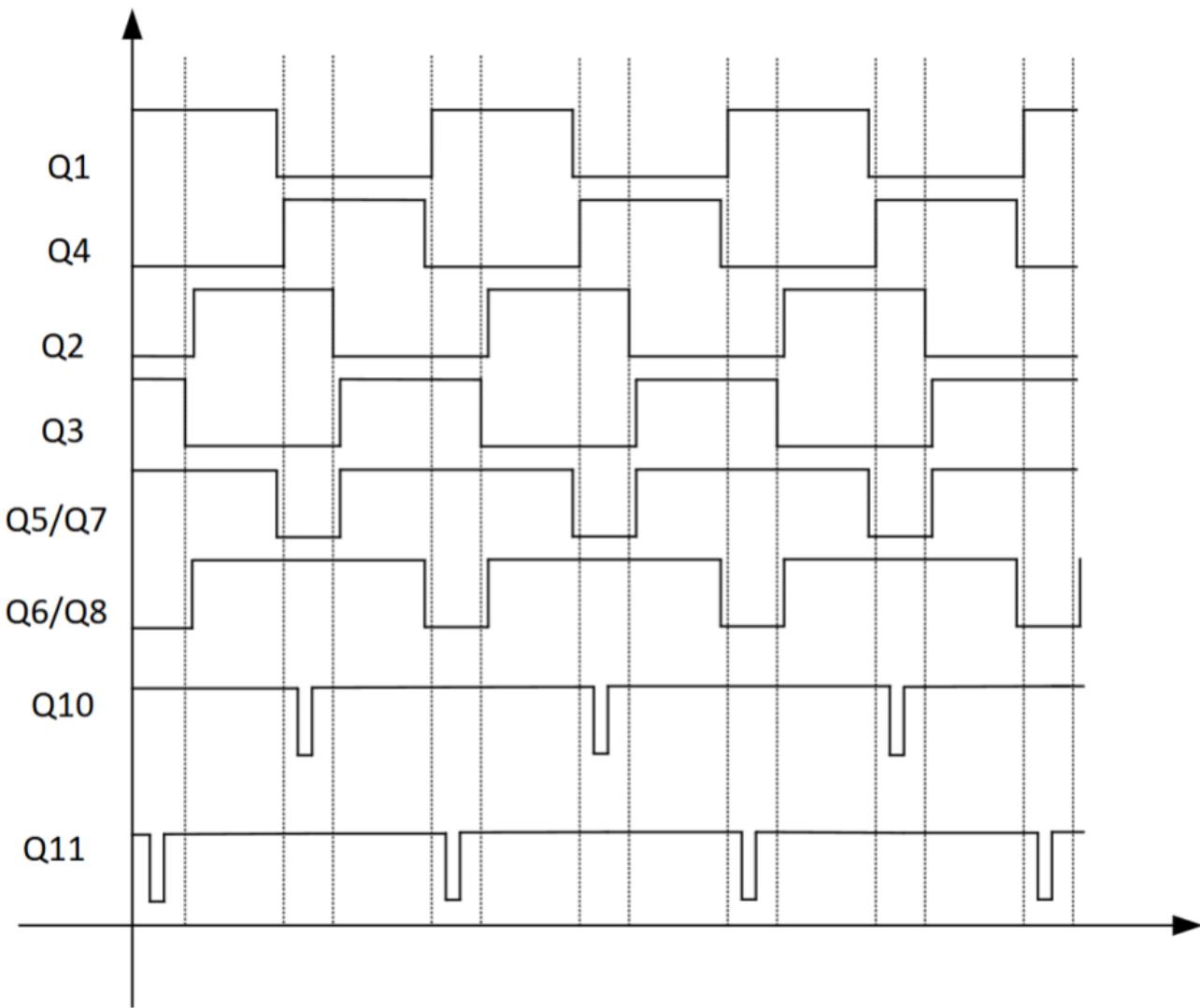


그림 4. PSFB와 제안된 액티브 클램프의 제어 체계. 출처: 텍사스 인스트루먼트

Q5 및 Q7이 꺼져도 Q6 및 Q8은 여전히 켜져 있습니다. 따라서 [그림 3](#)에 녹색 화살표로 표시된 것처럼 Q5 및 Q7의 클램프 루프 위치를 찾을 수 있습니다. Q10 및 Q11의 스위칭 주파수는 둘 다  $f_{sw}$ 이며,  $f_{sw}$ 의 두 배가 아닙니다.

즉 방정식 2, 방정식 3, 방정식 4, 방정식 5, 방정식 6에 따르면 각 PMOS의  $P_{on\_state}$ 는 원래의 사분의 일이고,  $P_{turn\_on}$ ,  $P_{turn\_off}$ ,  $P_{drive}$ ,  $P_{diode}$ 는 원래의 절반이 됩니다. 제안된 방법을 사용하면 클램프 회로의 손실을 부품 두 개로 분산시키고 손실을 더욱 줄이기 때문에 열 문제를 처리하기가 더 쉬워집니다.

이제 클램프 루프로 다시 돌아가 보겠습니다. Q5의 루프가 Q7보다 크고, 이는 Q6 및 Q8과 비슷합니다. Q5 및 Q6의 최소 클램프 루프를 얻으려면 동기식 정류기의 레이아웃에 주의를 기울여야 합니다.

## 제안된 액티브 클램프 성능

그림 5 및 그림 6에 텍사스 인스트루먼트의 GaN HEMT를 이용한 고전압-저전압 DC/DC 컨버터 레퍼런스 설계의 관련 테스트를 표시했습니다. 여기에서는 스위칭 주파수 200kHz에서 작동하는 제안된 액티브 클램프 회로를 사용했습니다. 그림 5에 정류기의 전압 스트레스를 표시했습니다.

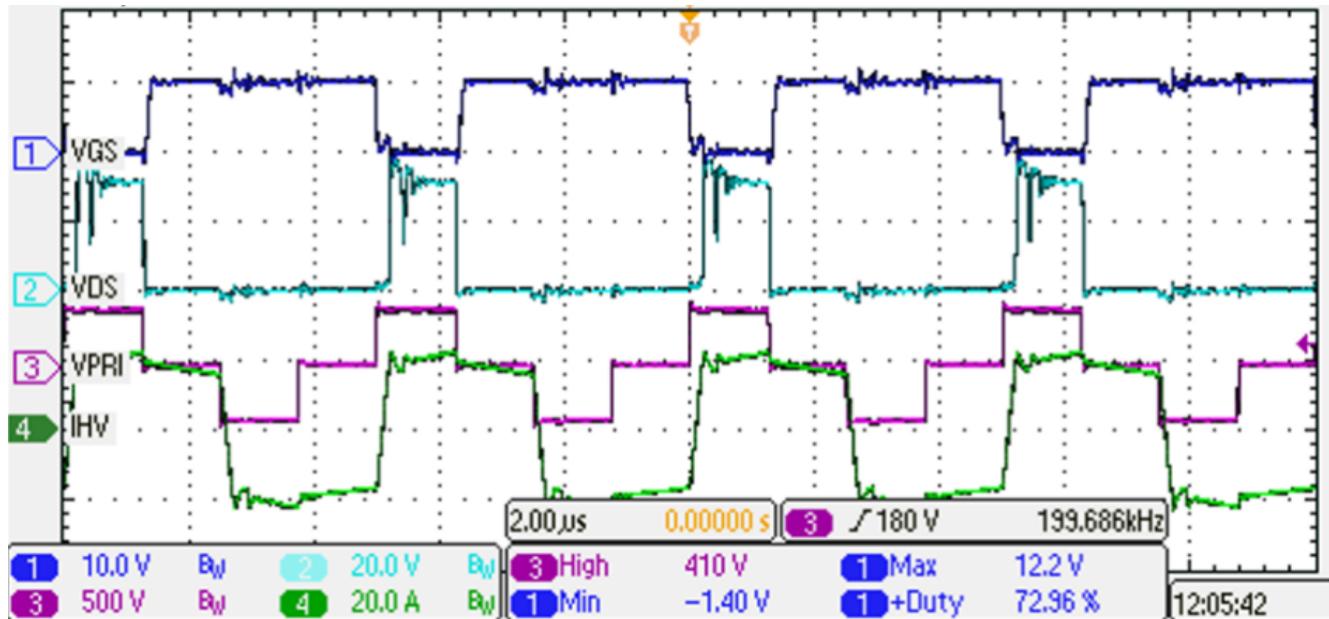


그림 5. 정류기의 전압 스트레스. 여기에서 CH1이 정류기의  $V_{gs}$ , CH2가 정류기의  $V_{ds}$ , CH3가 1차 변압기 권선 전압이고 CH4가 1차 변압기 권선 전류입니다. 출처: 텍사스 인스트루먼트

CH1이 정류기의  $V_{gs}$ , CH2가 정류기의  $V_{ds}$ , CH3가 1차 변압기 권선의 전압, CH4가 1차 변압기 권선의 전류입니다. 정류기의 최대 전압 스트레스는  $400V_{IN}$ ,  $13.5V_{OUT}$ ,  $250A I_{OUT}$ 에서  $45V$  미만입니다. 액티브 클램프 회로의 최대 온도는  $400V_{IN}$ ,  $13.5V_{OUT}$ ,  $180A I_{OUT}$ 에서 [2]  $46.6^{\circ}C$ 입니다(그림 6 참조). 즉, 제안된 제어 체계는 클램핑 MOSFET에 대하여 매우 우수한 열 성능을 실현합니다.

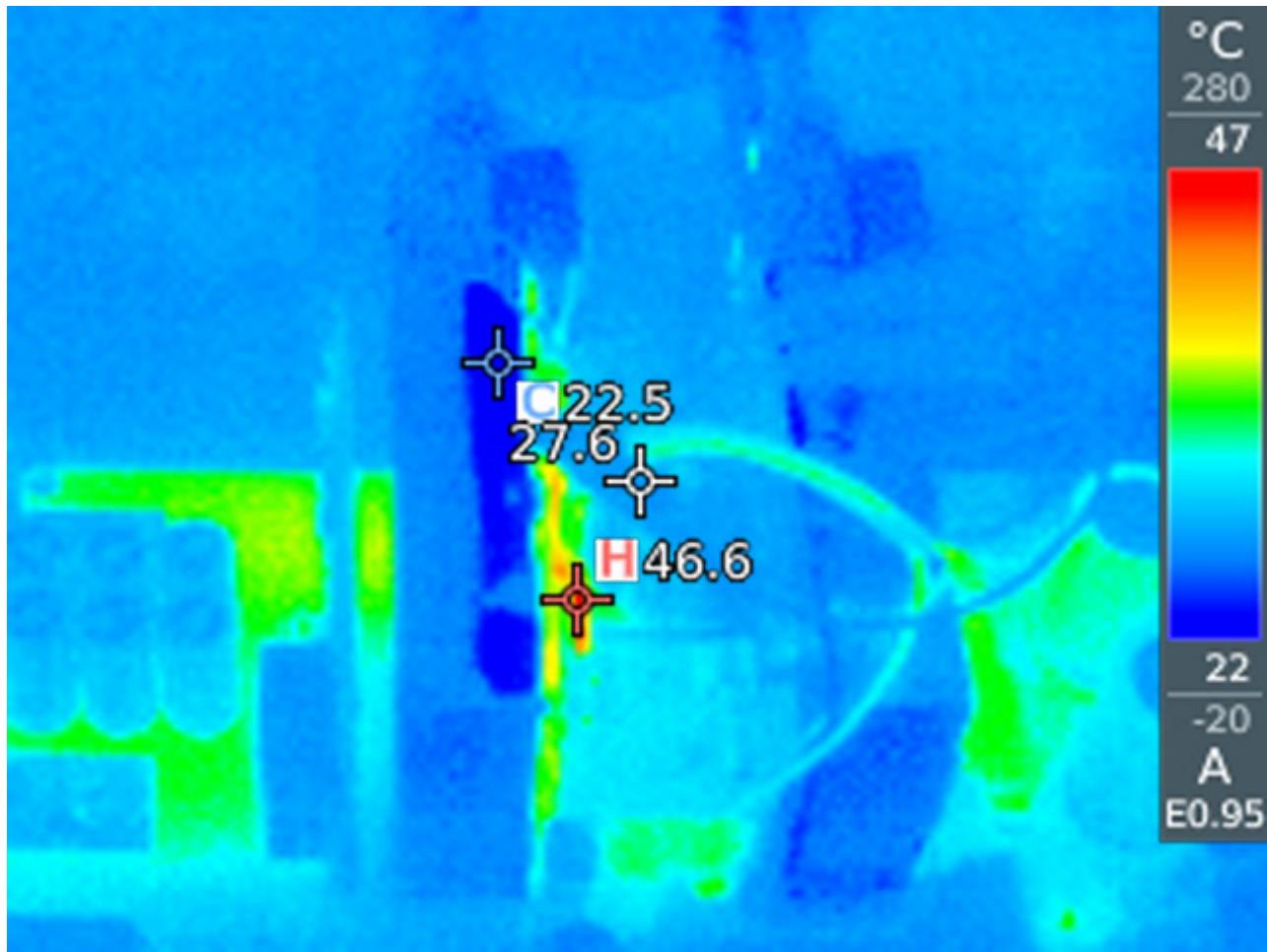


그림 6. 액티브 클램프 회로의 최대 온도가  $400V_{IN}$ ,  $13.5V_{OUT}$ ,  $180A I_{OUT}$ 에서  $46.6^{\circ}C$ 인 액티브 클램프 회로의 열 성능. 출처: 텍사스 인스트루먼트

### 열 문제가 없는 500kHz 액티브 클램프

스위칭 주파수를 200kHz에서 500kHz로 높이면 변압기 부피가 약 45% 작아져 [2] 고전압-저전압 DC/DC 컨버터의 전력 밀도를 높이는 데 도움이 됩니다. 제안된 방법을 사용하면 BOM 비용이 약간 늘어나겠지만, 설계자가 스위칭 주파수 500kHz에서 열 문제 없이 액티브 클램프를 실행할 수 있기 때문에 성능이 개선됩니다. PMOS의 펄스 드레인 전류가 NMOS보다 훨씬 작다는 것을 고려하여, 설계자는 필요한 경우 절연 드라이버와 바이어스 전원 공급 장치를 이용해 액티브 클램프에 NMOS를 사용할 수도 있습니다.

### 관련 콘텐츠

- 전원 팁 #135: ESS의 양방향 CLLLC 공진 컨버터 제어 체계
- 전원 팁 #134: 어려운 방식으로 전환하지 말고 PWM 폴 브리지를 사용하여 ZVS를 달성
- 전원 팁 #133: TLVR의 총 누설 인덕턴스를 측정하여 성능 최적화
- 정밀 클램프로 데이터 로거 보호
- 반전된 양극 트랜지스터가 신호 클램프 역할을 동시에 수행도 겸함
- 고속 클램프가 펄스 형성 회로 역할 수행

### 참고 자료

1. Betten, John. 2016. "전원 팁: 7단계로 R-C 스너버를 계산합니다." TI E2E™ 설계 지원 포럼 기술 문서, 2016년 5월.
2. "GaN HEMT를 이용한 고전압-저전압 DC-DC 컨버터 레퍼런스 설계." 2024. 텍사스 인스트루먼트 레퍼런스 설계 테스트 보고서 번호 PMP41078, 문서 번호 TIDT403A. Accessed Dec. 16, 2024.

이전에 EDN.com에 게시되었습니다.

## 상표

모든 상표는 해당 소유자의 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](http://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](#) 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