

전원 공급 장치 설계 세미나

Phase-shifted full-bridge 컨버터의
기초

저자

Sheng-yang Yu, Ben Lough, Richard Yin 및 Qing Ye



주제

- 왜 위상 시프트 풀 브리지(PSFB)입니까?
 - 전력 추세와 소프트 스위칭 컨버터의 필요성
 - PSFB 대상 애플리케이션
- PSFB 작동 및 설계 고려 사항
 - PSFB는 어떻게 작동하며 어떻게 소프트 스위칭을 구현합니까?
 - PSFB용 출력 정류기 유형
 - 출력 정류기의 전압 스파이크 및 클램핑 옵션
 - 전압 모드 및 피크 전류 모드 제어
 - 동기 정류기(SR) 동작 모드
 - 경부하 관리
- PSFB 설계 예시
- 요약

왜 PSFB일까요?

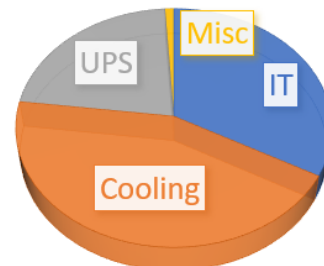
전력의 추세

- 더 작은 크기, 더 가벼운 무게, 더 높은 효율의 시스템에 대한 요구
- 80 Plus 인증 및 OCP(Open Compute Project) 모듈형 하드웨어 시스템-공통 중복 전원 공급 장치(M-CRPS) 사양으로 높은 효율성 제공

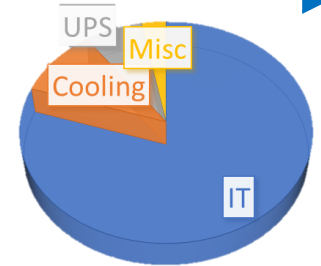
효율성:	10% 부하	20% 부하	50% 부하	100% 부하	참고
80 Plus 티타늄	90%	94%	96%	91%	230V _{AC} 입력에서
M-CRPS(<2,500W)	90%	94%	96%	92%	240V _{AC} 입력에서
M-CRPS(≥2,500W)	90%	94%	96%	94%	240V _{AC} 입력에서



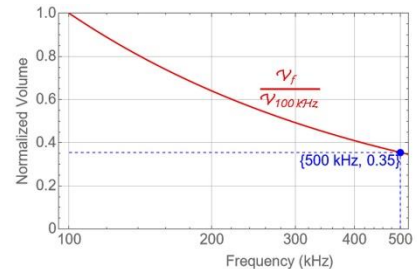
$$PUE = \frac{\text{Total Datacenter Power}}{\text{Actual IT Power}}$$



전력 사용
효율성(PUE): 3



PUE: 1.25



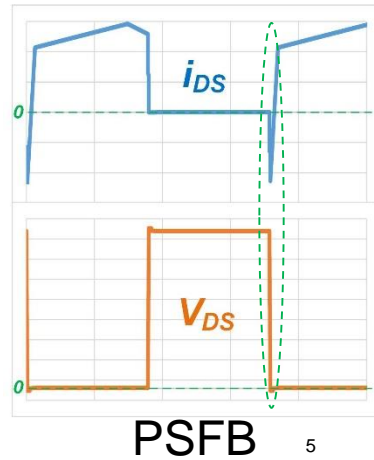
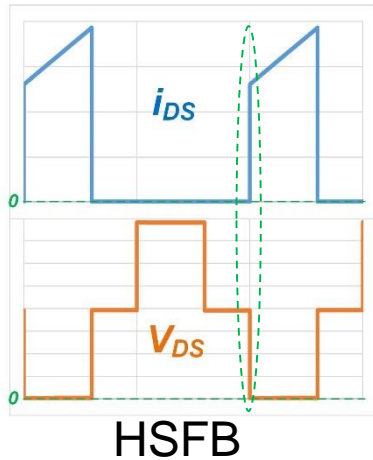
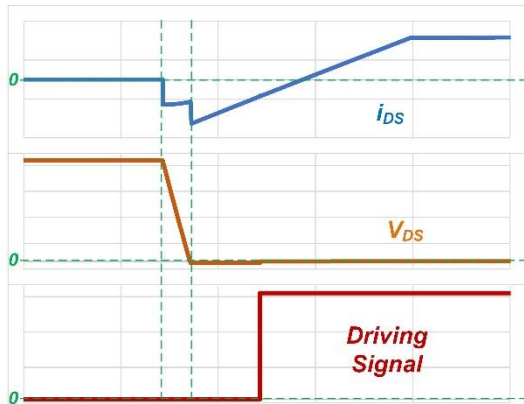
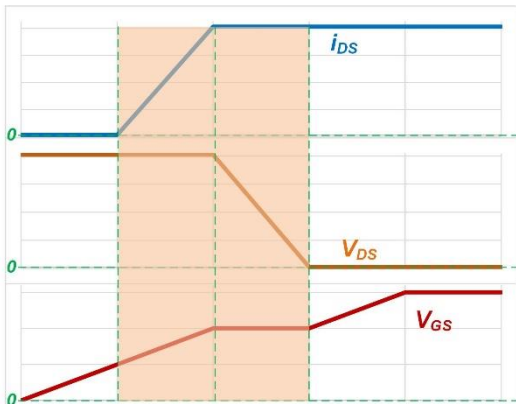
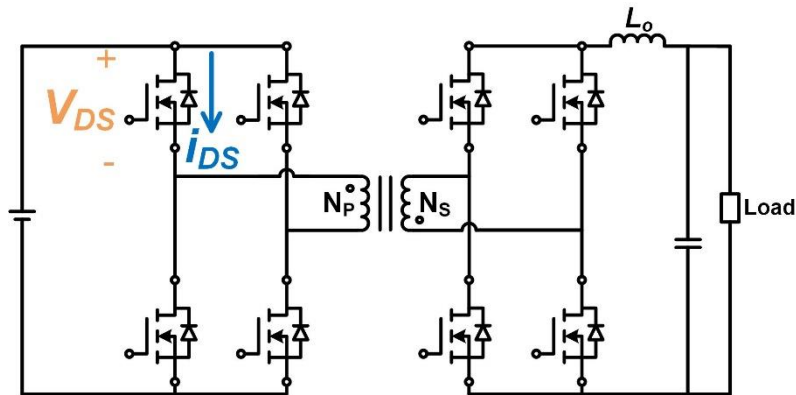
소프트 스위칭의 동기 부여

하드 스위치 턴온

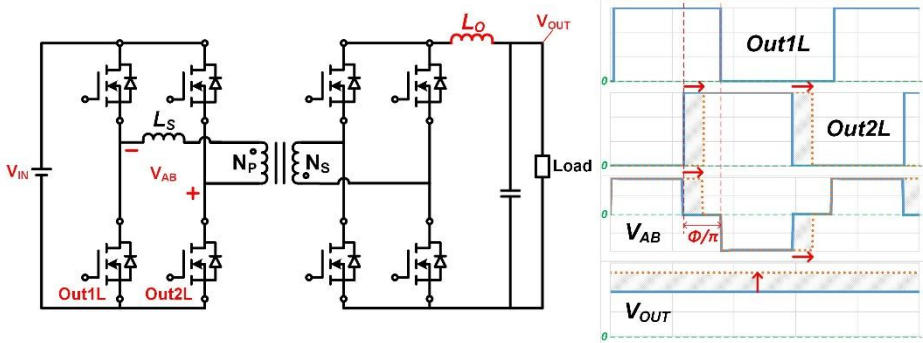
- 턴온 시 MOSFET 전류/전압 오버랩
- 턴온 속도(t_{on} 손실) 대 스위치 노드 과도 전압(dV/dt)(EMI 잡음)의 균형 유지
- 예: 하드 스위치 풀 브리지 컨버터(HSFB)

소프트 스위치 턴온

- V_{GS} 가 적용되기 전에 MOSFET V_{DS} 이 방전됨
- 높은 효율을 위해 턴온 속도가 중요하지 않음
- 더 높은 F_{sw} 허용

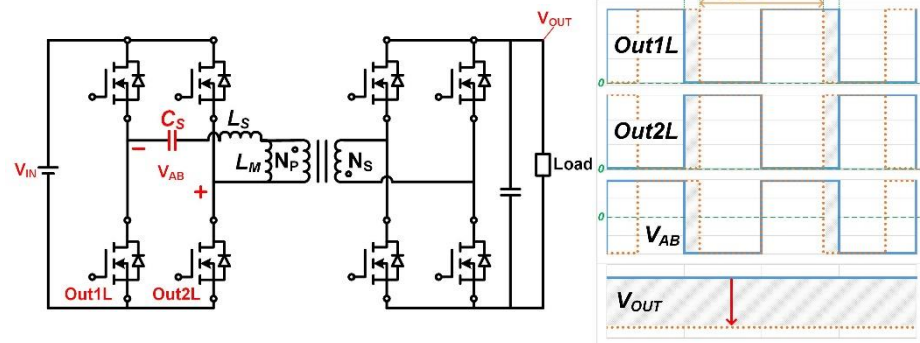


토폴로지 비교: PSFB 대 LLC



PSFB 컨버터

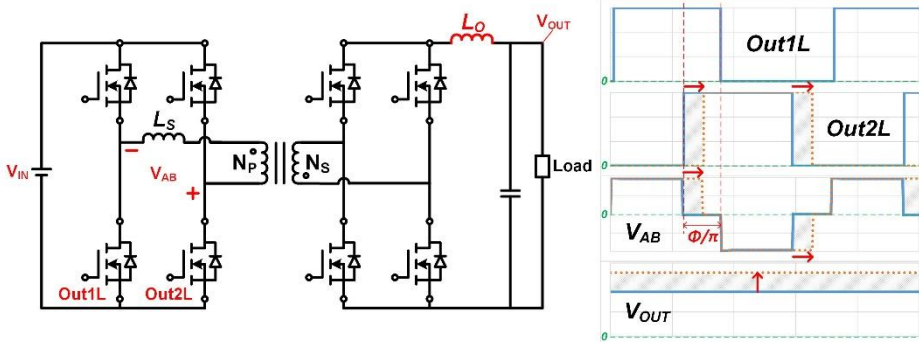
- L_S 및 L_O 에 저장된 에너지를 제로 전압 스위칭(ZVS)에 사용합니다.
- 다양한 V_{OUT}/V_{IN} 게인에 대한 위상 각 변경
- 장점
 - 더 빠른 과도 응답
 - 넓은 전압 작동 범위 지원
 - 고정 주파수, 순위한 SR 제어
- 단점
 - 정류기 역복구
 - 경부하 시 주 레그에서 ZVS 손실
 - 더 높은 정류기 전압 스트레스



LLC 시리즈 공진 컨버터

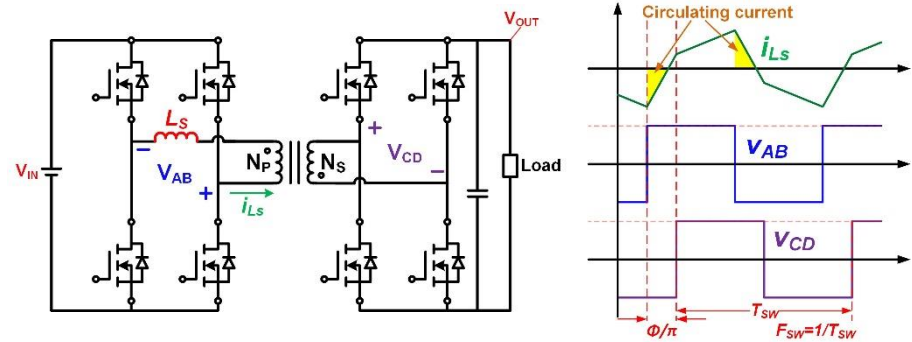
- L_M 에 저장된 에너지를 ZVS에 사용
- 다른 V_{OUT}/V_{IN} 게인을 위해 F_{sw} 변경
- 장점
 - 직렬 공진 f
 - $F_{sw} \leq f_r$ 에서 출력 정류기에 소프트 스위칭
 - $f_{sw} \approx f_r$ 시 더 높은 효율
- 단점
 - 더 큰 2차 RMS 전류
 - 더 까다로워진 SR 제어
 - 제한된 작동 범위

토폴로지 비교: PSFB 대 DAB



PSFB 컨버터

- L_s 및 L_o 에 저장된 에너지를 ZVS에 사용합니다.
- V_{OUT}/V_{IN} 게인: **1차 하프 브리지** 사이의 위상 각도에 의해 결정됩니다.
- 듀얼 액티브 브리지(DAB)보다 낮은 출력 리플 전류
- 더 높은 출력 정류기 스트레스

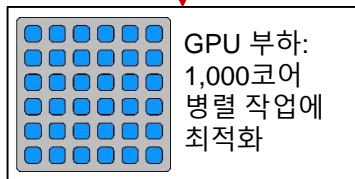
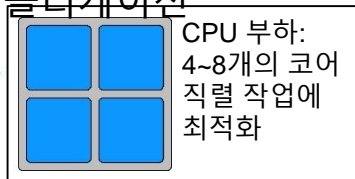
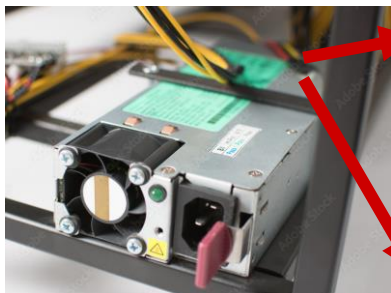


DAB 컨버터

- L_s 에 저장된 에너지를 ZVS에 사용
- V_{OUT}/V_{IN} 게인: **변압기 권선** 사이의 위상 각도에 의해 결정됩니다.
- 단상 시프트 제어를 통한 큰 순환 전류
- 다중 위상 전환 제어를 적용하면 순환 전류가 낮아집니다.
- PSFB보다 높은 출력 리플 전류

PSFB 대상 애플리케이션:

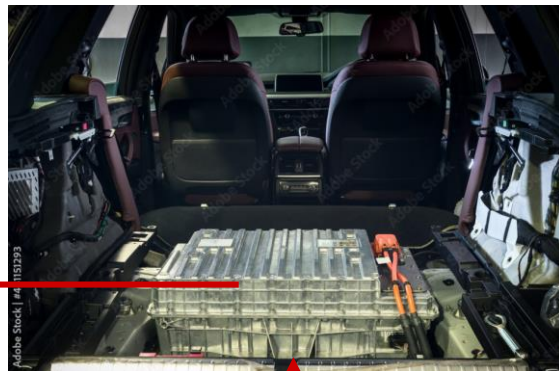
- PSFB는 다음과 같은 애플리케이션에 적합할 수 있습니다.
 - 빠른 과도 요구 사항
 - 그래픽 처리 장치(GPU) 부하가 있는 서버 전원 공급 장치(PSU) 12V 버스에서 10A/μs 이상
 - 넓은 입력/출력 범위
 - 고전력 배터리 애플리케이션



전기 자동차
배터리:
250V~
450V



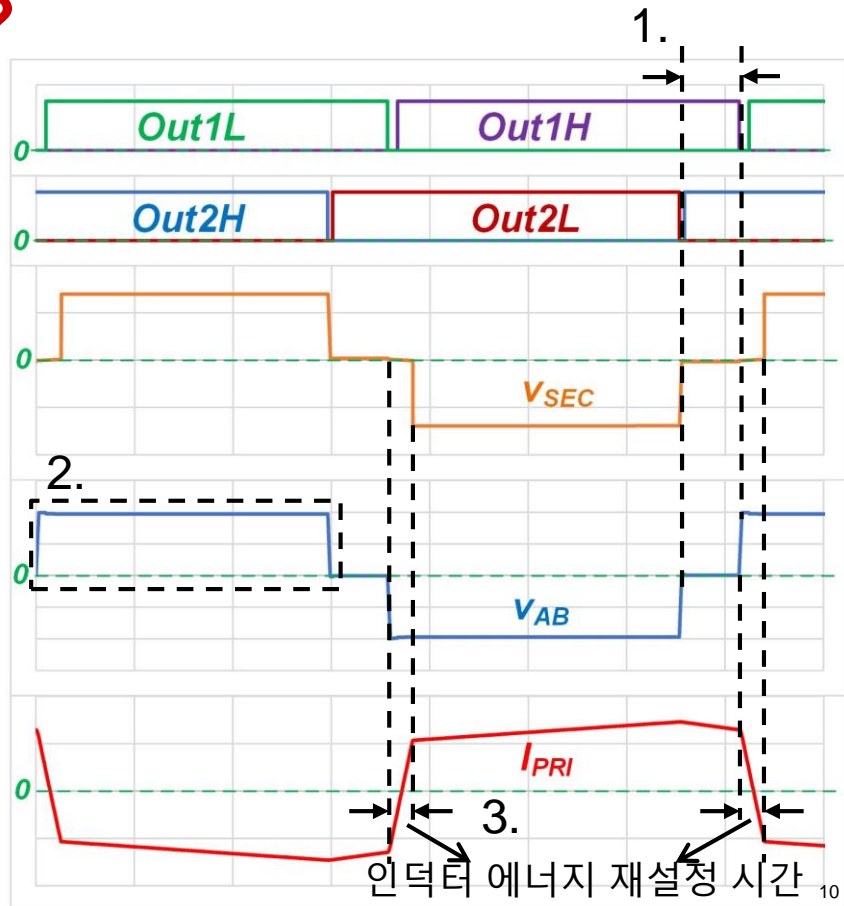
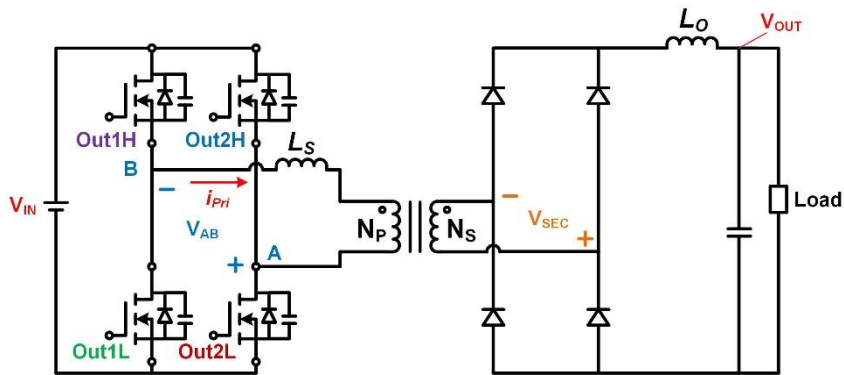
자동차
배터리:
9V~16V,
최대 300A



소프트 스위칭 및 동작

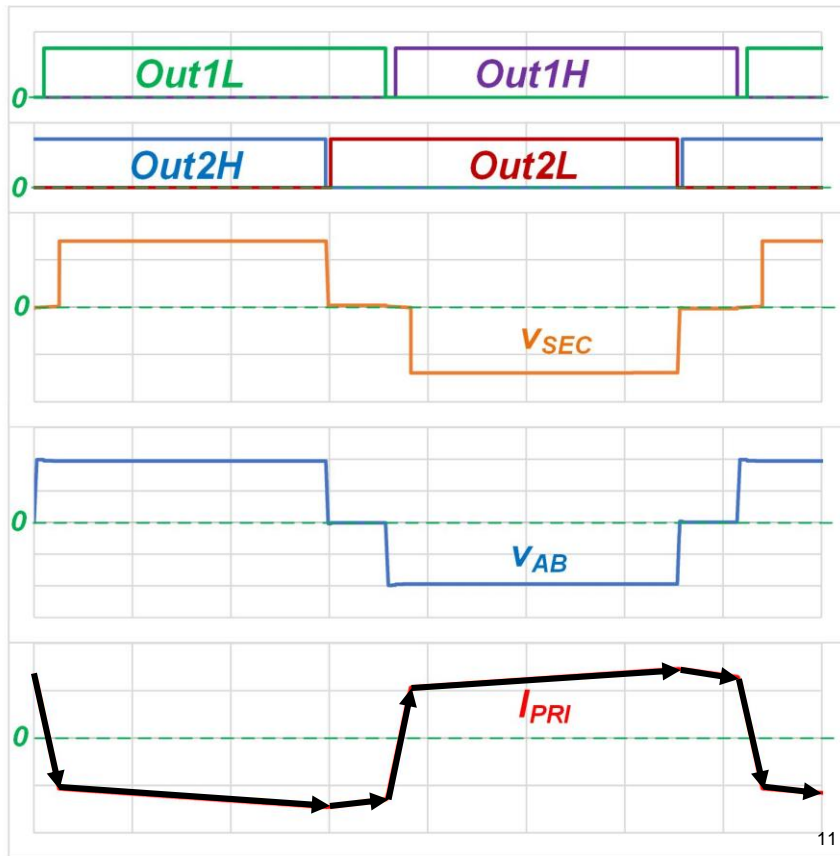
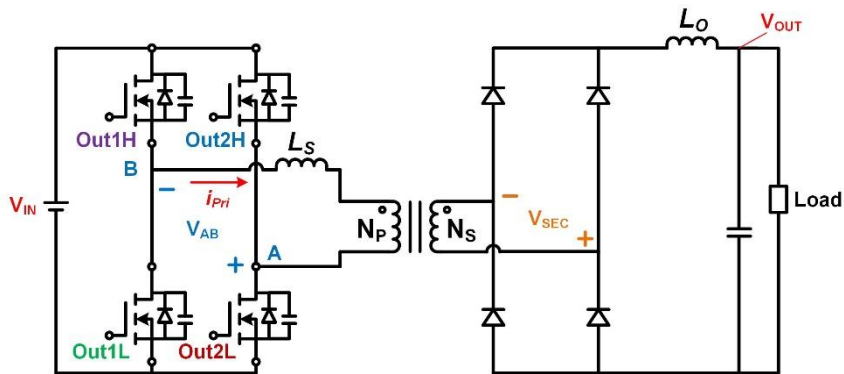
PSFB는 어떻게 동작 합니까?

1. 0이 아닌 전압 변압기 펄스 폭을 제어하기 위한 위상 이동
2. 레귤레이션을 위한 출력 스테이지의 벅 동작
3. 듀티 사이클 손실로 인한 유효 듀티 사이클 제한



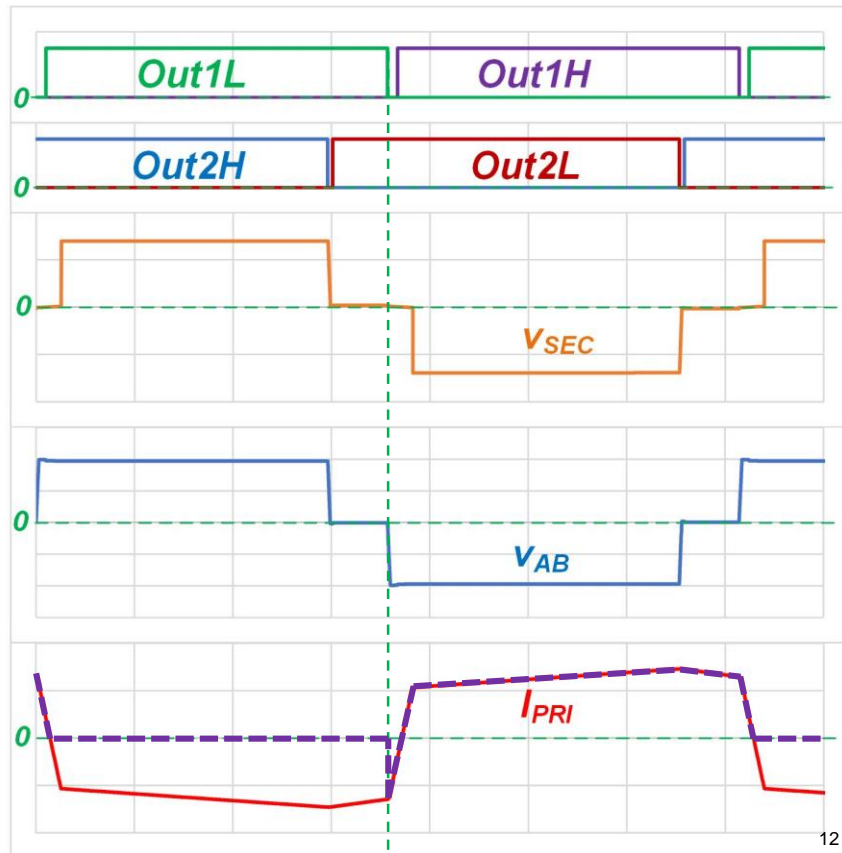
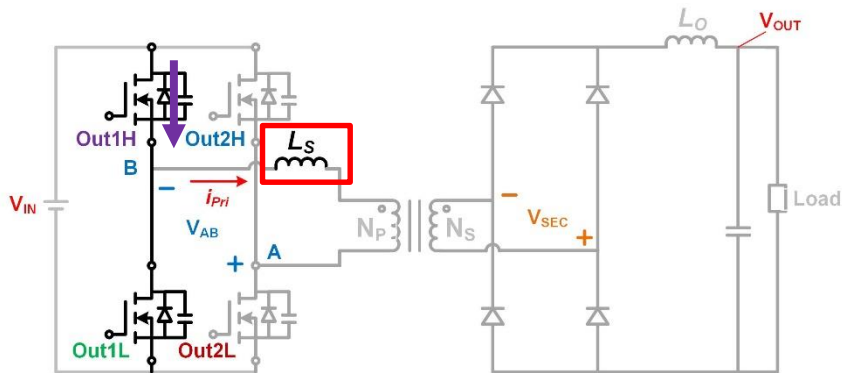
PSFB는 어떻게 소프트 스위칭을 구현합니까?

- Freewheeling 전류 허용
 - L_S 및 L_O 에너지를 ZVS에 사용할 수 있습니다.



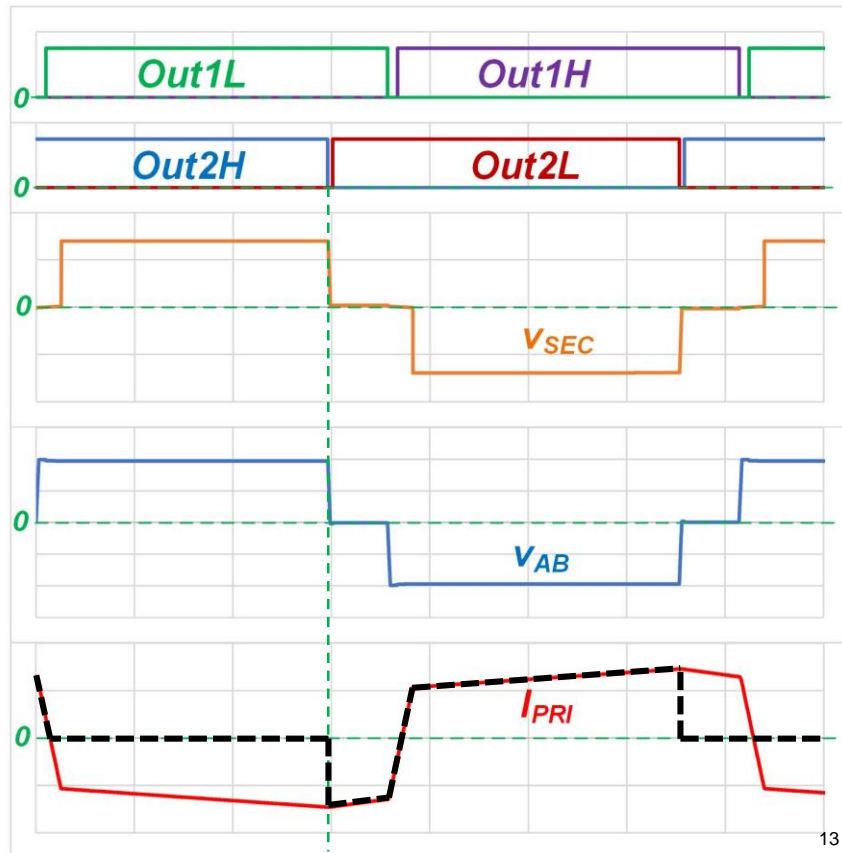
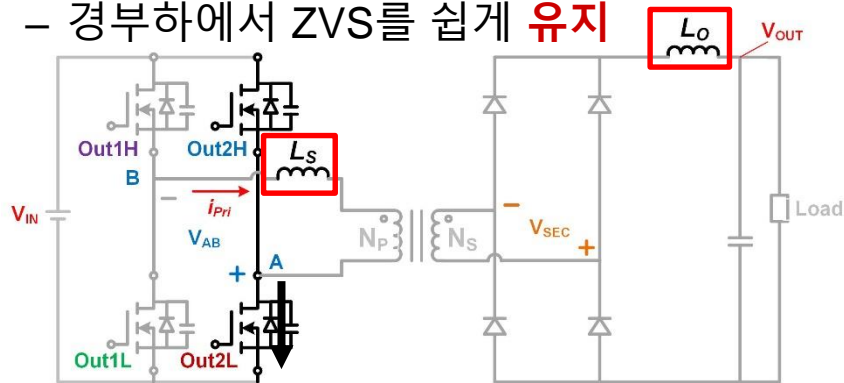
PSFB는 어떻게 소프트 스위칭을 구현합니까?

- 프리휠링 전류 허용
 - L_S 및 L_O 에너지를 ZVS에 사용할 수 있습니다.
- 레그 1 ZVS: 주로 L_S 에 의존합니다.



PSFB는 어떻게 소프트 스위칭을 구현합니까?

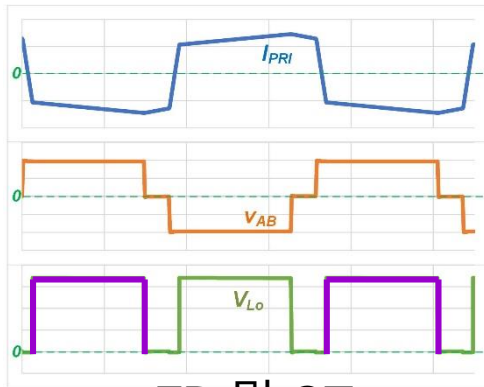
- 프리휠링 전류 허용
 - L_S 및 L_O 에너지를 ZVS에 사용할 수 있습니다.
- 레그 1 ZVS: 주로 L_S 에 의존합니다.
 - 경부하에서 ZVS를 쉽게 **손실**
- 레그 2 ZVS: L_S 및 L_O 모두에 의존합니다.
 - 경부하에서 ZVS를 쉽게 **유지**



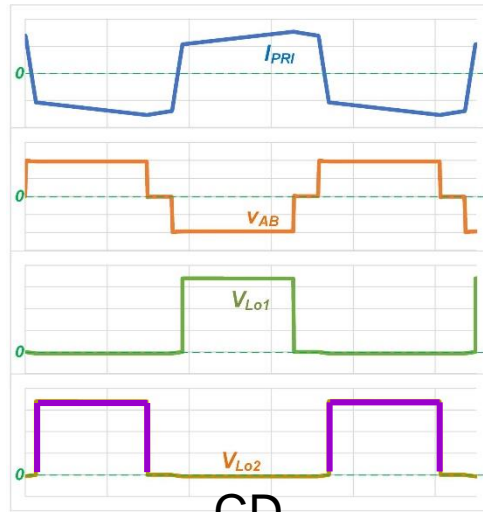
정류기 및 클램프

PSFB용 출력 정류기

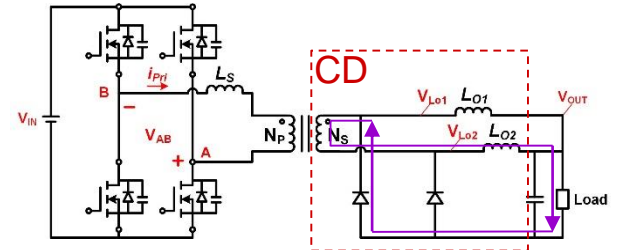
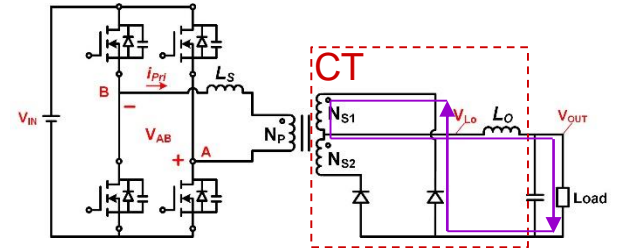
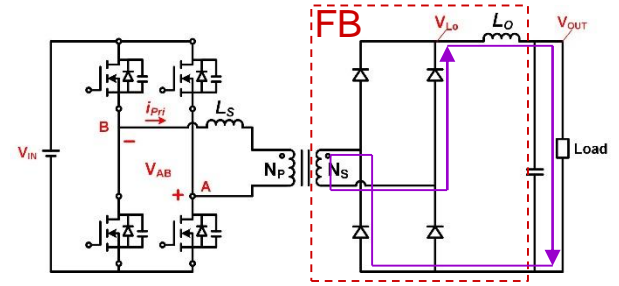
- 정류기에는 세 가지 유형이 있습니다.
 - 풀 브리지(FB) 정류기
 - 중간 탭(CT) 정류기
 - 전류 더블러(CD) 정류기



FB 및 CT

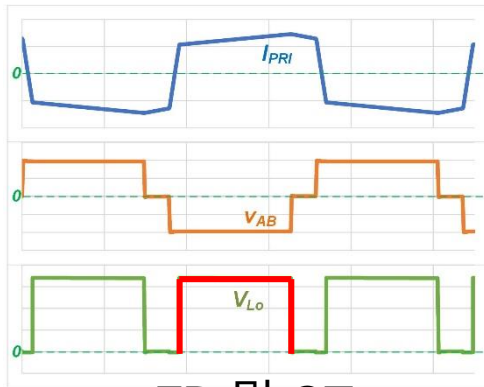


CD

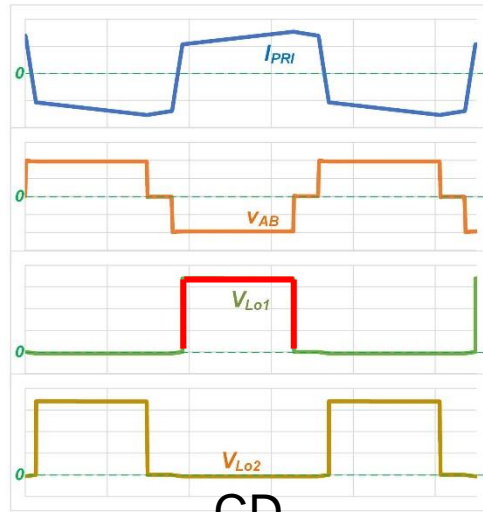


PSFB용 출력 정류기

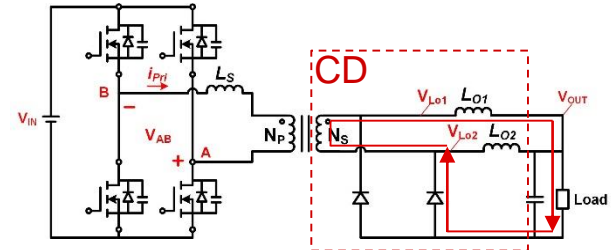
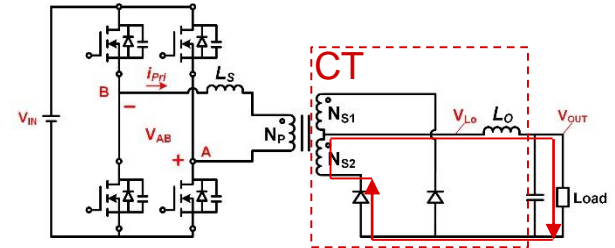
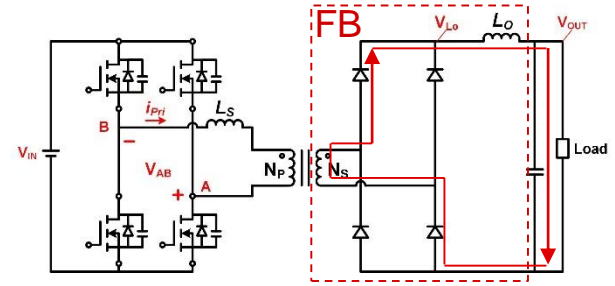
- 정류기에는 세 가지 유형이 있습니다.
 - 풀 브리지(FB) 정류기
 - 중간 탭(CT) 정류기
 - 전류 더블러(CD) 정류기



FB 및 CT

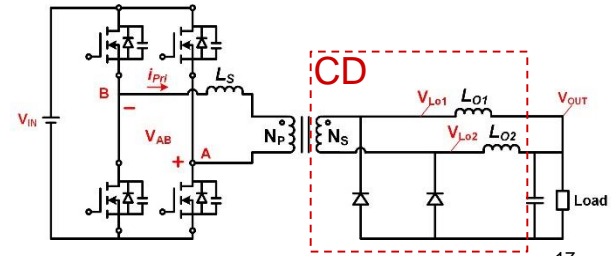
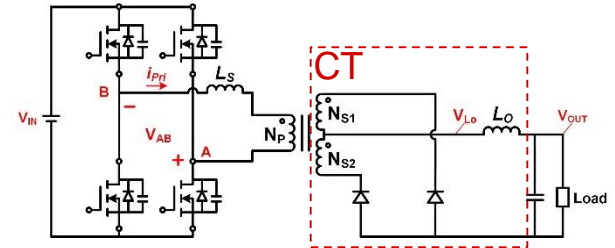
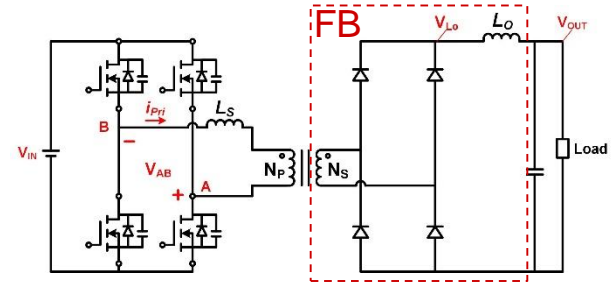
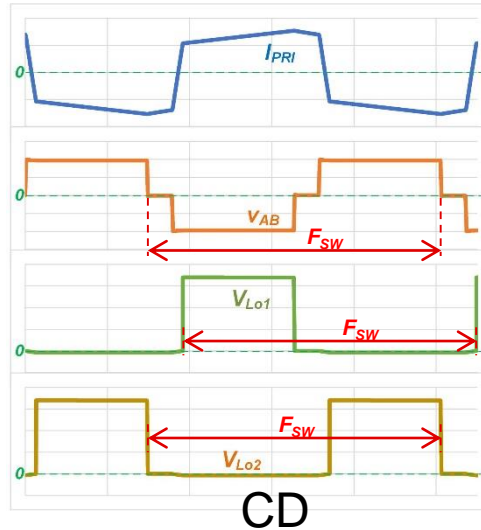
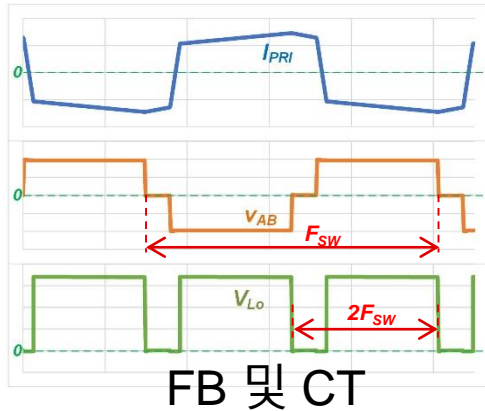


CD



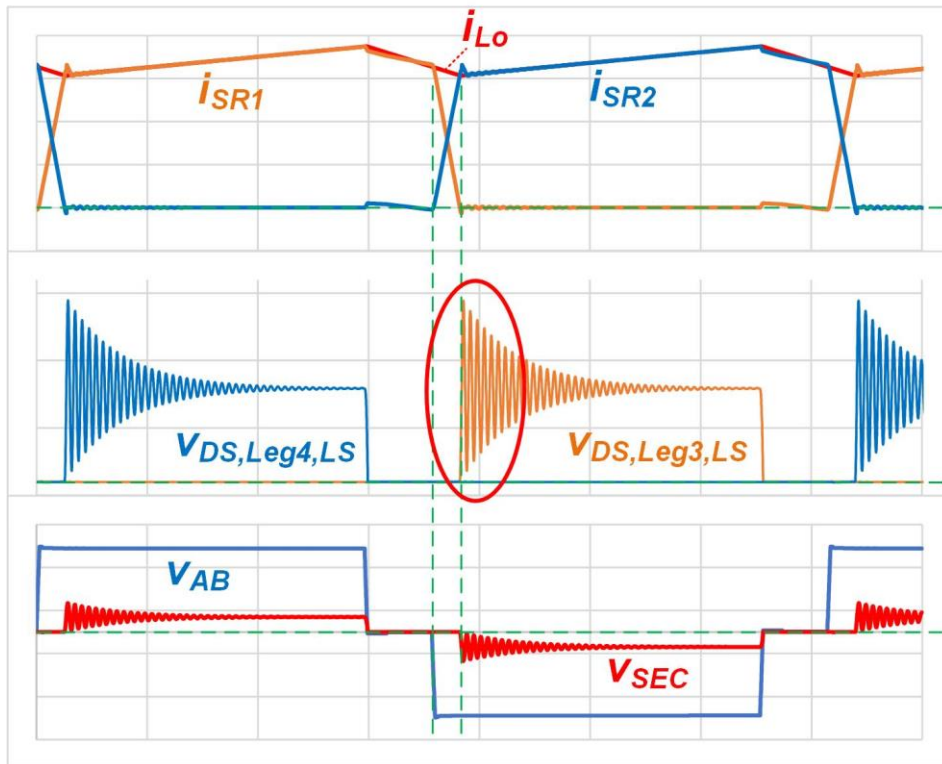
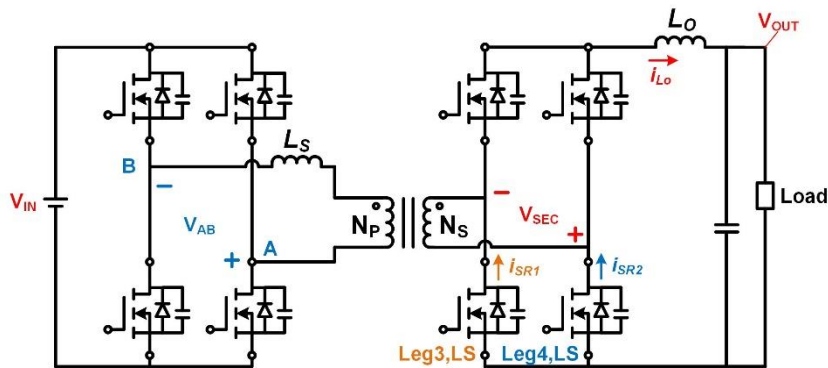
PSFB용 출력 정류기

유형	인덕터 F_{SW}	D 범위	N_s	Rec	L_o	특성
FB	$2 \times F_{SW, PRI}$	0~100%	1	4	1	변압기 사용률 향상, 높은 V_o 에 적합
CT	$2 \times F_{SW, PRI}$	0~100%	2	2	1	가장 적은 부품 수, 낮은 변압기 사용률
CD	$1 \times F_{SW, PRI}$	0~50%	1	2	2	변압기 사용률 향상, 절반 i_{L_o}



출력 정류기의 전압 스파이크

- 정류기 C_{OSS} 와 공진하는 변압기 권선 직렬 인덕터
- 전압 피크가 $2V_{IN} \frac{N_S}{N_P}$ 까지 높아질 수 있습니다.



클램프 정류기 전압 스파이크: 패시브

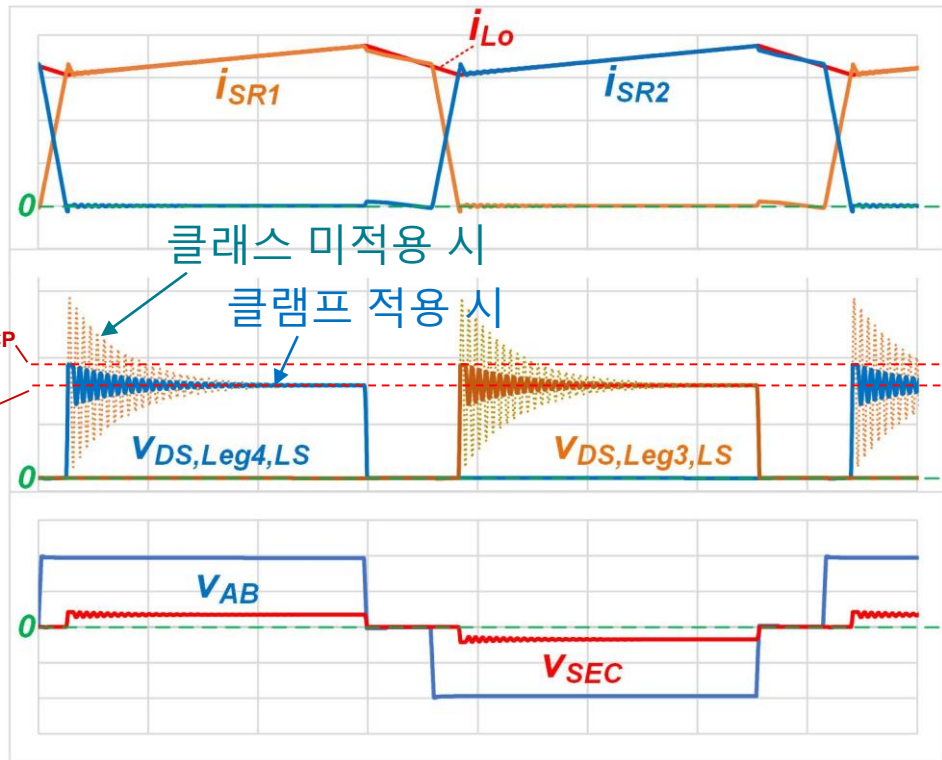
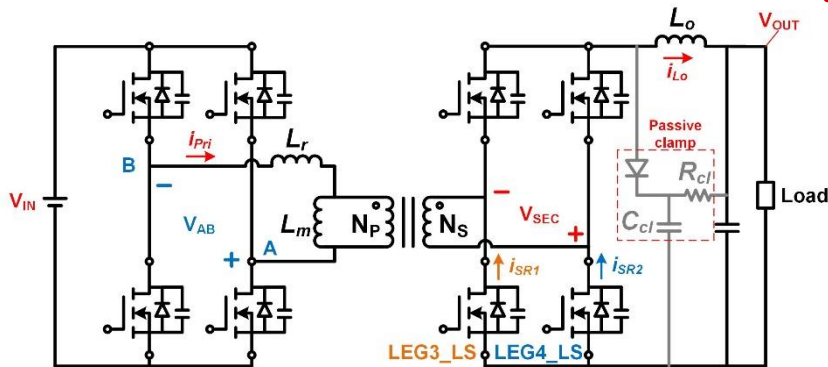
- 이상적인 전압 소스로서의 C_{clamp}

$$R_{cl} = \frac{(V_{CP} - V_{OUT})(V_{CP} - V_d)}{C_{cl} V_{CP} (2V_d - V_{CP}) F_{sw}}$$

- 클램프 저항 소산

$$P_{R_{cl}} = \frac{(V_{CP} - V_{OUT})^2}{R_{cl}}$$

더 작은 R_{cl} ⇒ 더 낮은 V_{CP}
 ⇒ 더 큰 $P_{R_{cl}}$



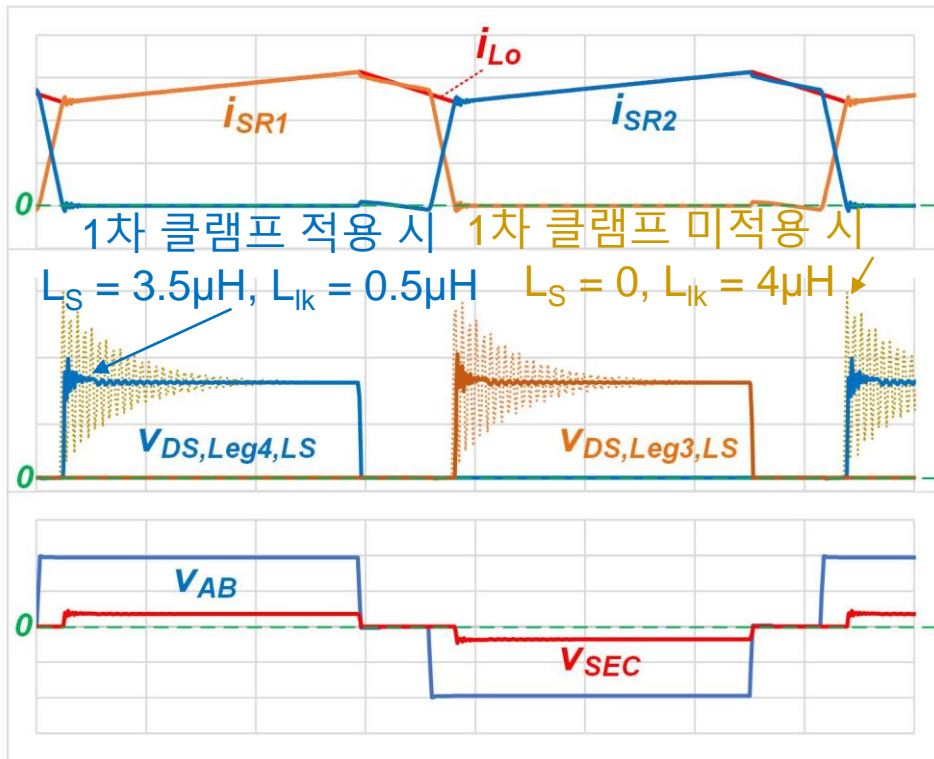
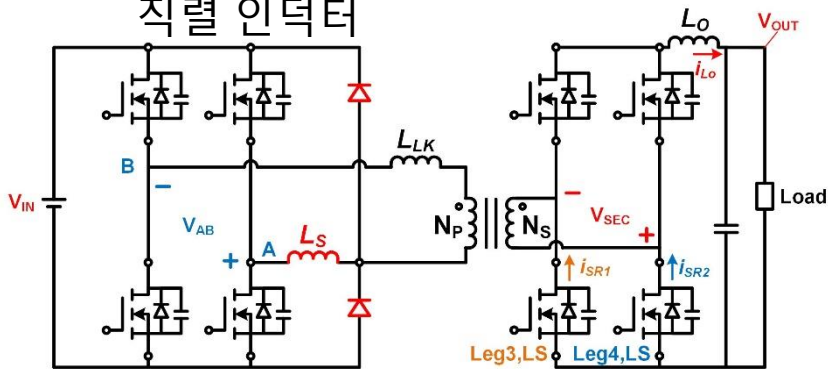
클램프 정류기 전압 스파이크: 1차 클램프

- 장점:

- L_S 에너지 재활용 허용
- 정류기 전압 스트레스를 낮추기 위해 변압기 권선을 잘 결합할 수 있습니다.

- 단점:

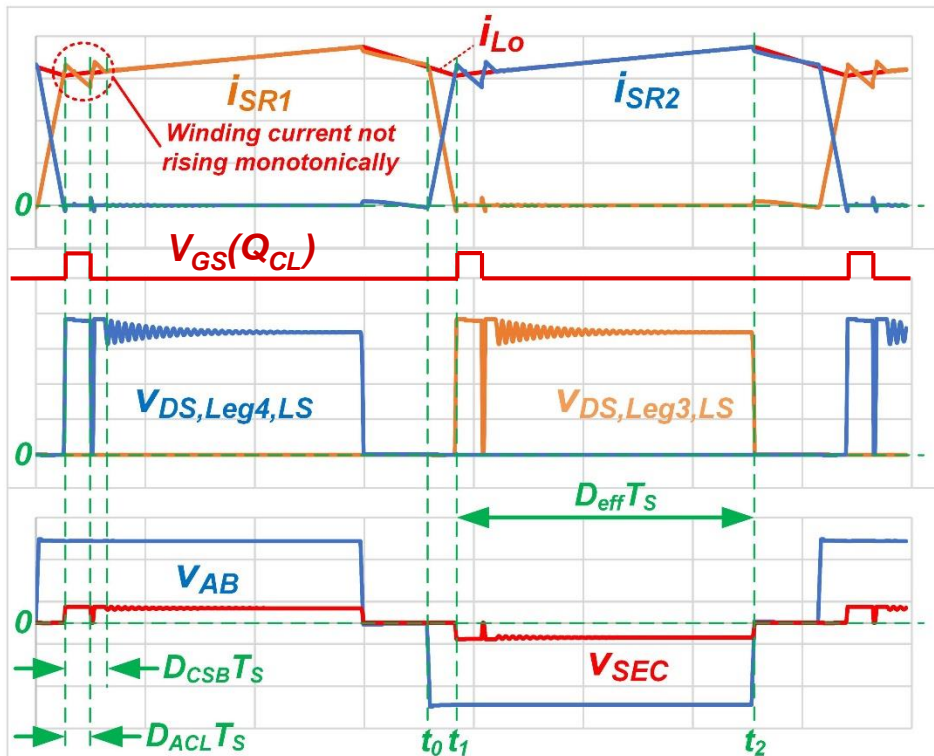
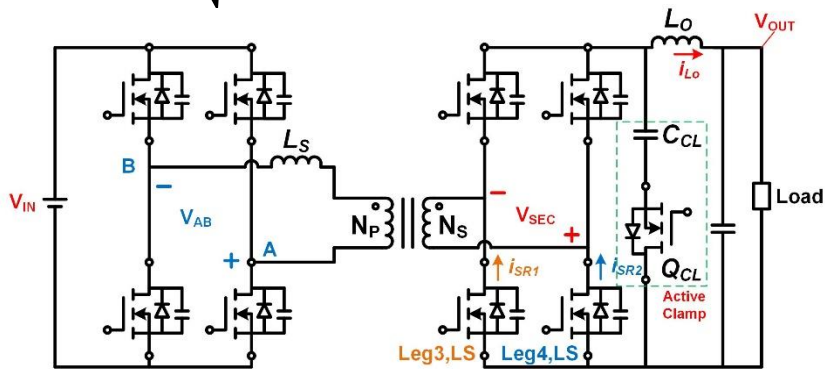
- ZVS에 필요한 추가 다이오드 및 개별 직렬 인덕터



클램프 정류기 전압 스파이크: 능동 클램프

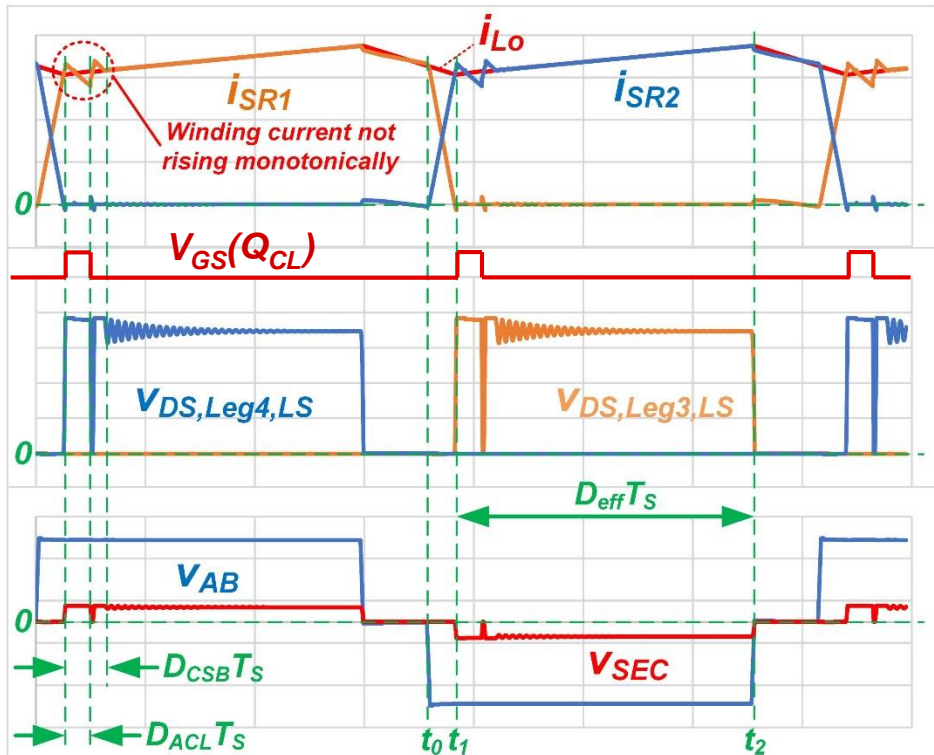
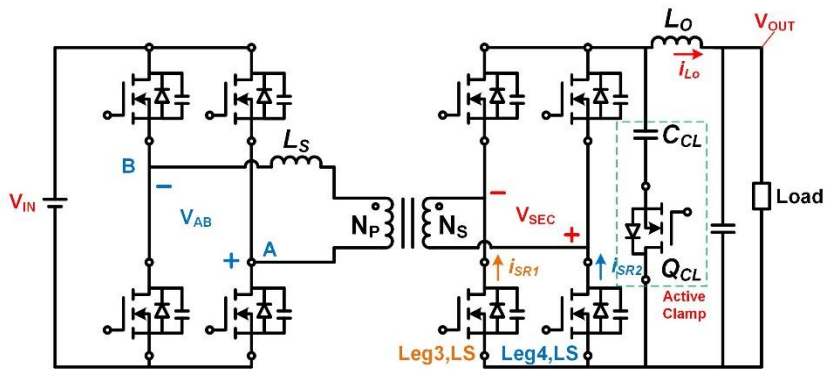
- 정류기 전압이 클램핑되도록 t_1 뒤에 Q_{CL} 을 켭니다. V_{CCL}
- 상대적으로 낮은 리플 전압을 위한 C_{CL} 커패시턴스의 크기:

$$2\pi \sqrt{\left(\frac{N_S}{N_P}\right)^2 \times L_S \times C_{CL}} \gg T_S$$



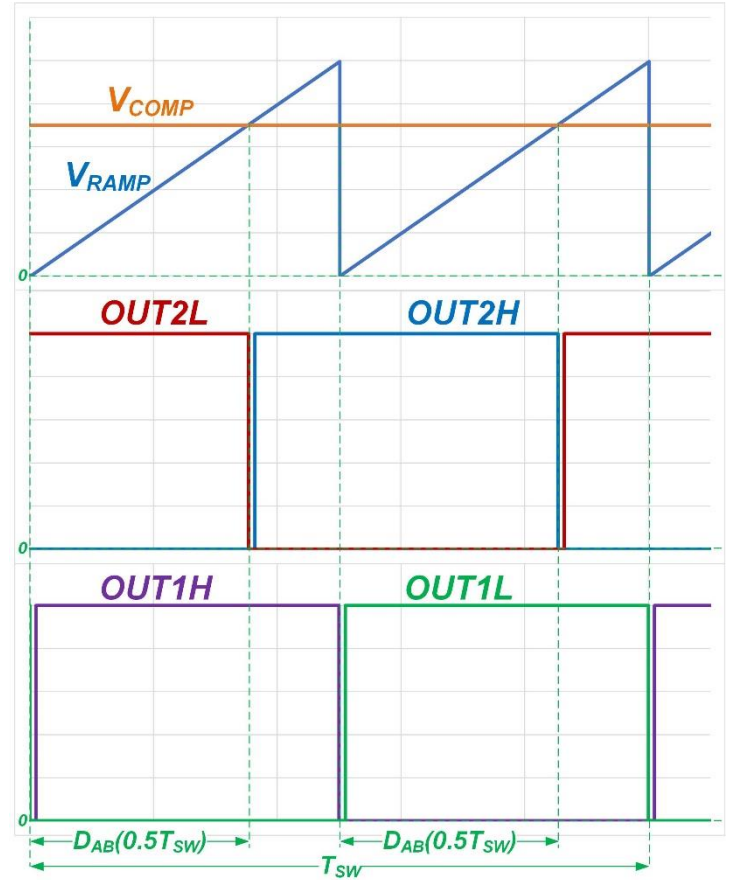
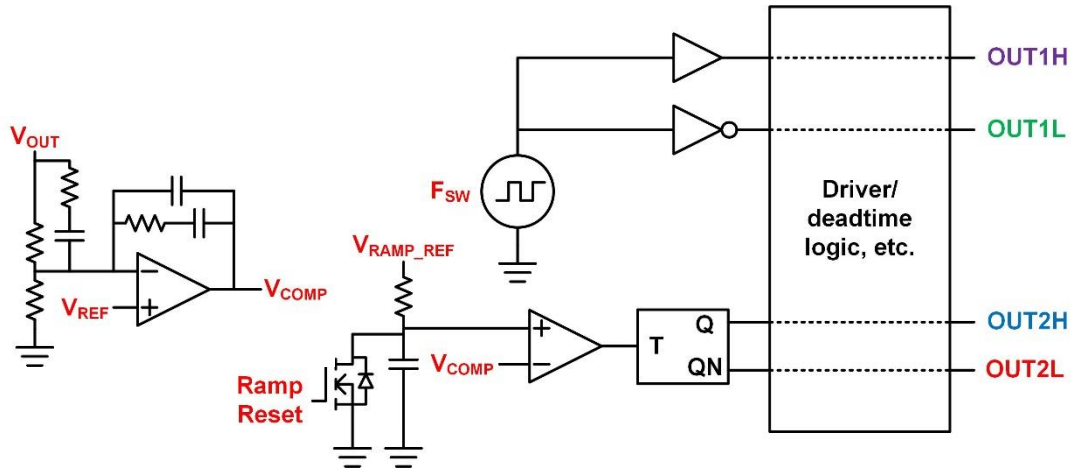
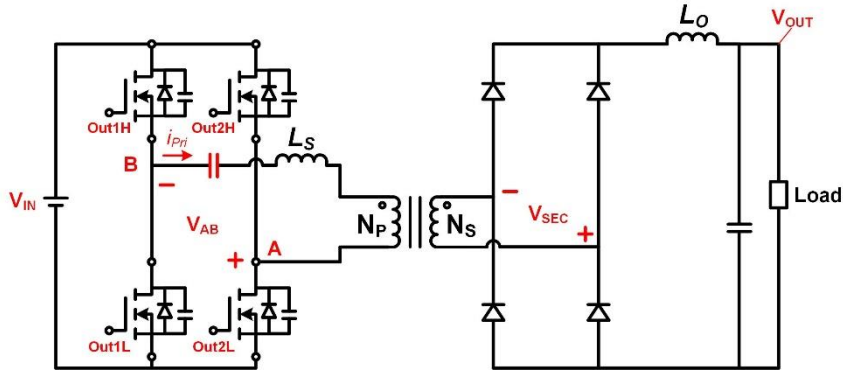
클램프 정류기 전압 스파이크: 능동 클램프

- i_{PRI} 및 i_{SR} 에 전류 왜곡을 생성합니다.
 - 피크 전류 모드 제어를 어렵게 만듭니다.
- Q_{CL} 은 클램핑을 위해 매우 짧은 시간 동안만 수행하면 됩니다.
 - 더 긴 $D_{ACL}T_S \Rightarrow$ 더 큰 i_{CL} 및 더 넓은 비단조 전류 지속 시간

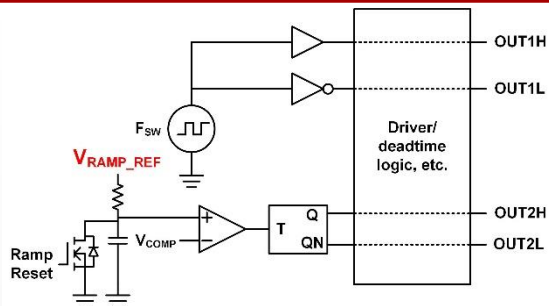


제어

PSFB 제어

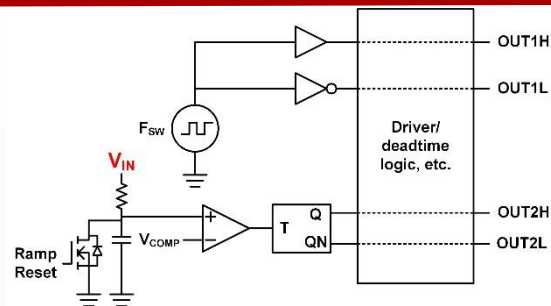


PSFB 제어 모드



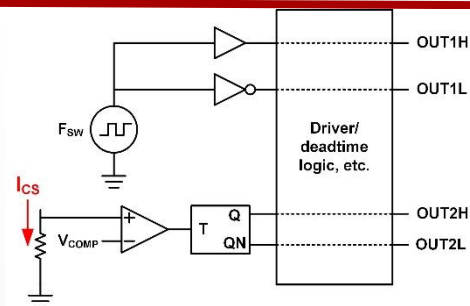
전압 모드 제어

- 스위칭 주파수의 클럭으로 직접 제어되는 고압측/저압측 쌍 1개
- T 플립플롭으로 제어되는 두 번째 고압측/저압측 쌍



피드포워드를 통한 전압 모드 제어

- 전압 램프 레퍼런스는 V_{IN} 또는 V_{IN} 에 비례하는 전압에서 공급됩니다.
- 입력 전압 변화에 즉각적인 반응

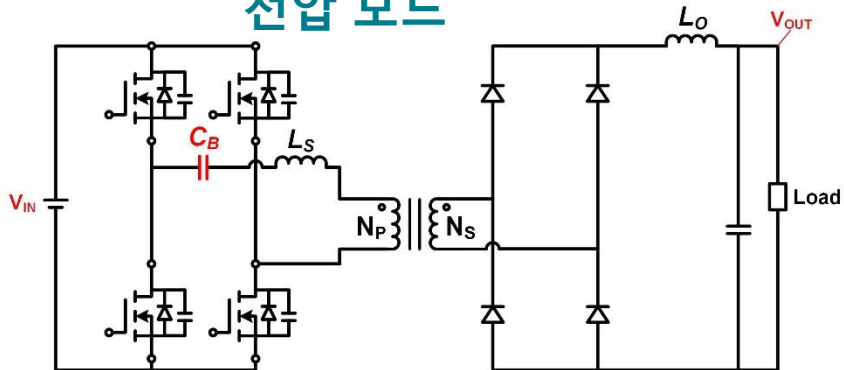


피크 전류 모드 제어

- 전력계의 전류 정보가 램프 신호를 대체
- 전류 감지(CS) 저항기와 증폭기 또는 CS 변압기 공통 방법

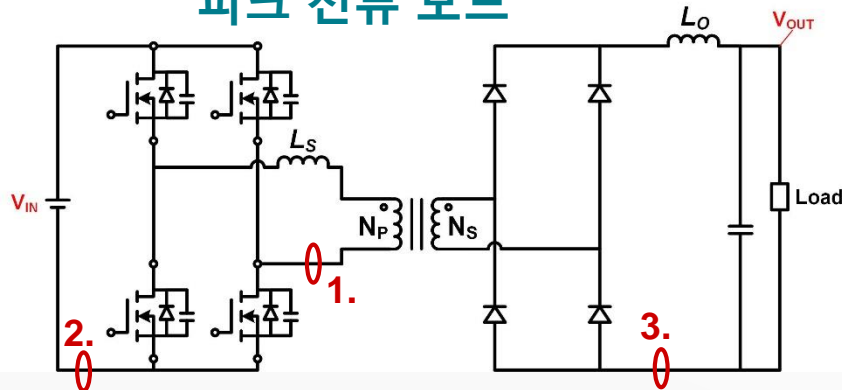
전압 모드와 피크 전류 모드 비교

전압 모드



- 변압기 포화를 방지하기 위해 DC 차단 커패시터 C_B 가 필요합니다.
- 커패시터를 차단하면 PSU 설치 공간과 SR의 전압 스트레스가 증가합니다.

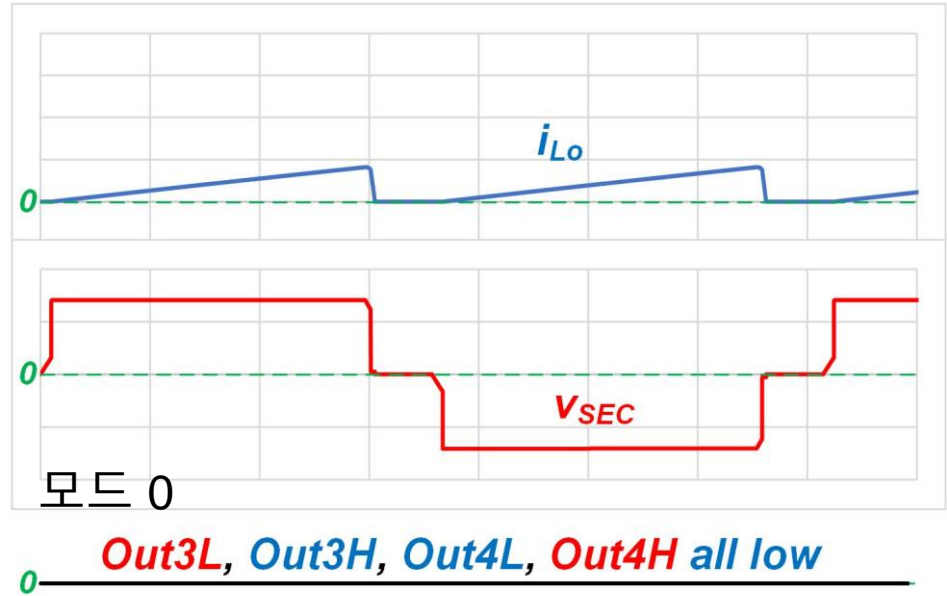
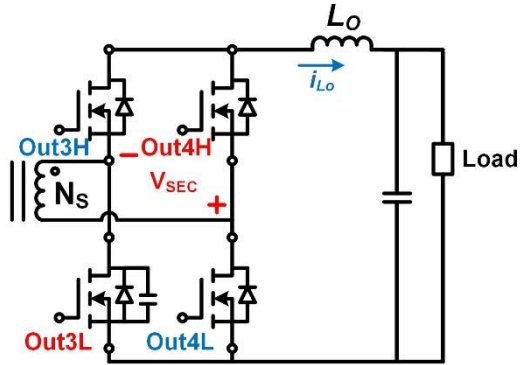
피크 전류 모드



- CS 변압기 코어 자동 재설정
 - DC 전류 정보 미포함
- CS 변압기 재설정이 더 까다로움
 - 더 높은 기생 루프 인덕턴스
- 저항기와 CS 증폭기가 일반적임
 - 자화 전류 정보 누락

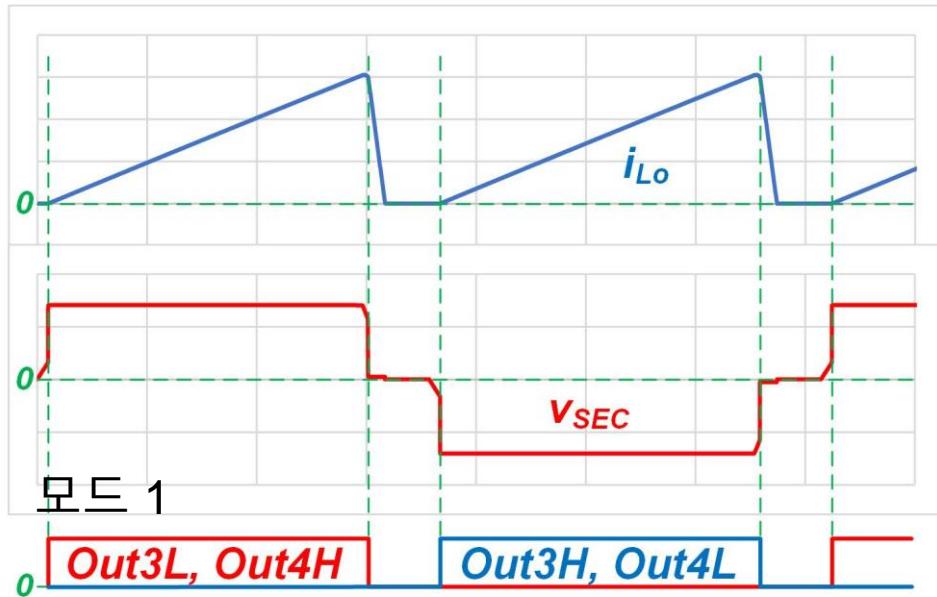
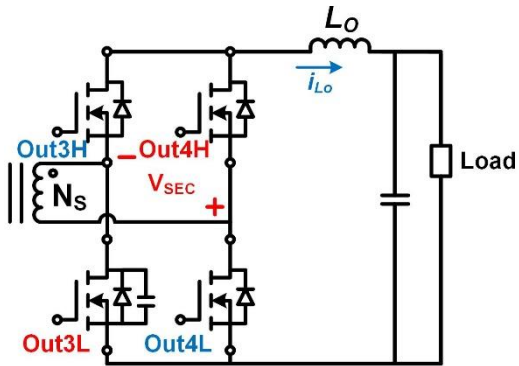
PSFB의 다양한 SR 모드

- 모드 0: 다이오드 전도(불연속 전도 모드[DCM])



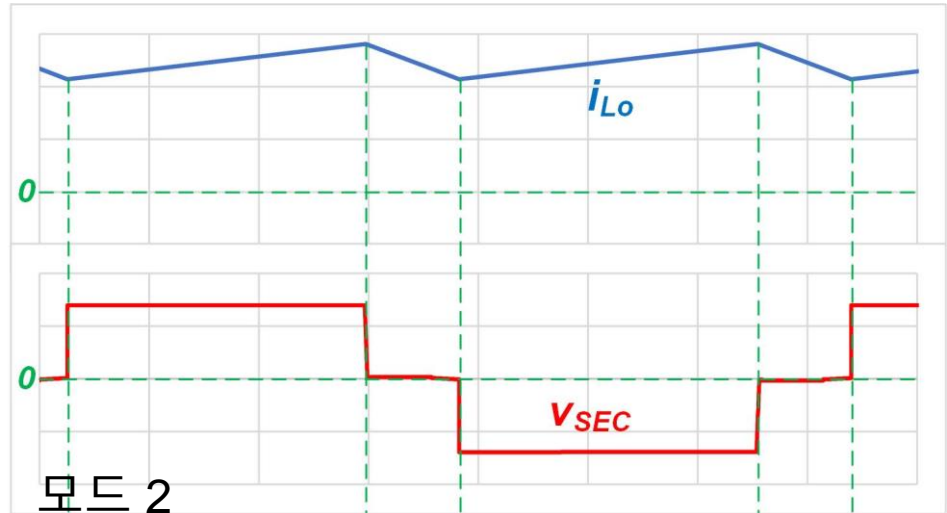
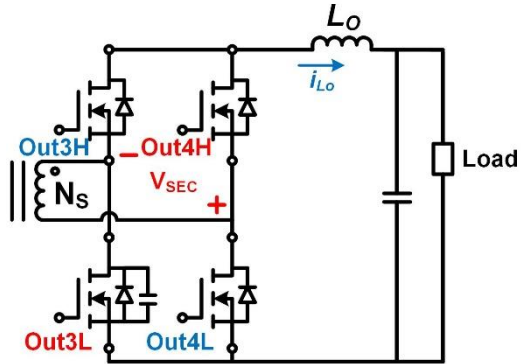
PSFB의 다양한 SR 모드

- 모드 1: 인덕터 충전 기간 동안에만 SR 채널 전도
 - 역전류 전도 방지



PSFB의 다양한 SR 모드

- 모드 2: 프리힐링 기간 동안 모든 정류기/FET 켜기
 - 과부하 시 더 낮은 전도 손실



모드 2

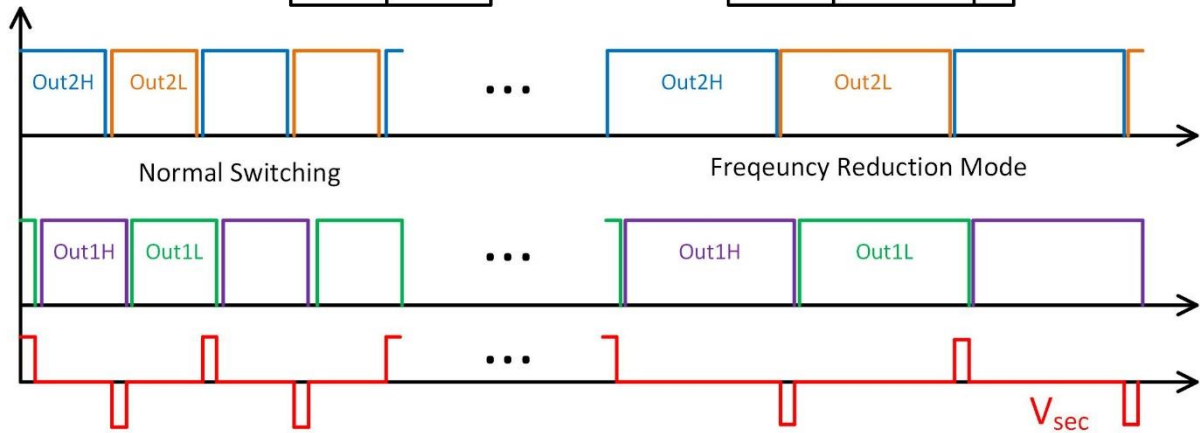
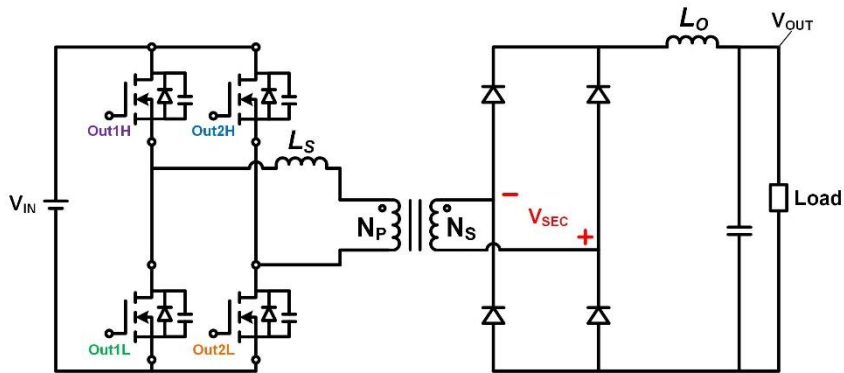
Out3L, Out4H

Out3H, Out4L

모든 SR이 켜짐

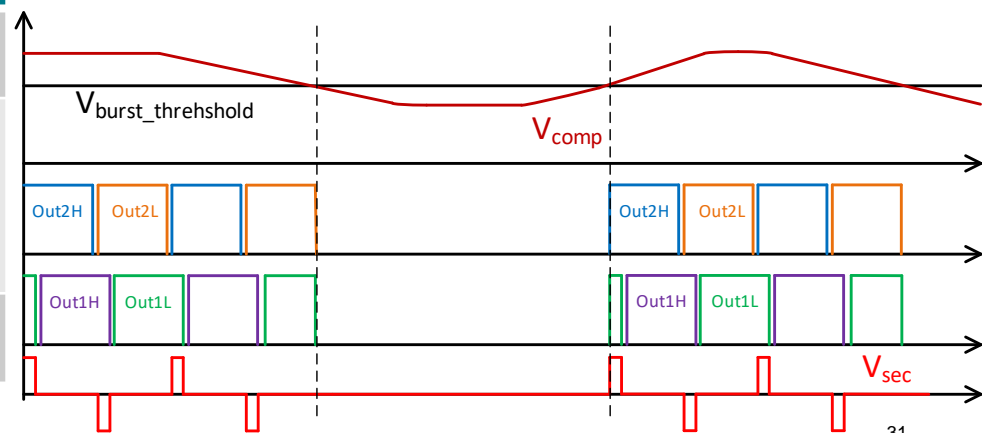
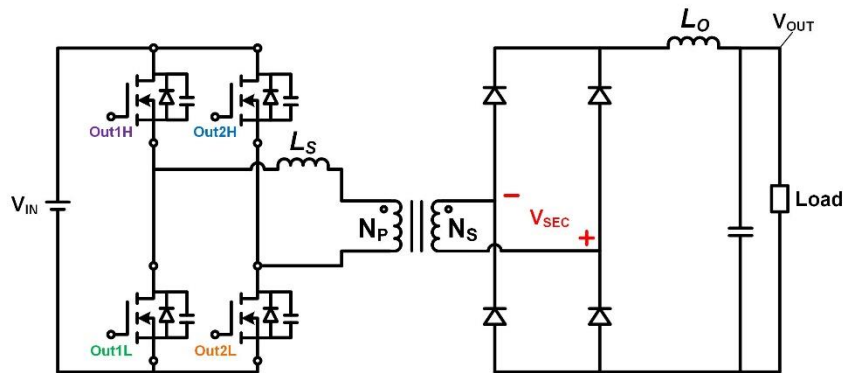
경부하 관리: 주파수 감소 모드

- PSFB가 지속적으로 전환
- 최소한의 정시성을 유지하면서 유효 듀티 사이클을 줄일 수 있음
- 게이트 드라이브 변압기 권장하지 않음(포화)



경부하 관리: 히스테리시스 버스트 모드

- V_{comp} 가 $< V_{burst}$ 임계값이 되면 PSFB는 스위칭을 중지합니다.
- V_{comp} 가 $> V_{burst_threshold}$ 이상이 되면, PSFB가 스위칭을 재개합니다.



	주파수 감소 모드	히스테리시스 버스트 모드
과도 응답	FR 모드에서 제어 루프 대역폭 감소	고속
CPU 사용률	큰 경우, 필요한 F_{sw} 계산 필요	작은 경우, 컴퍼레이터에 기반한 펄스 폭 변조(PWM) 활성화/비활성화
출력 리플	소형	FR 모드에 비해 더 큼

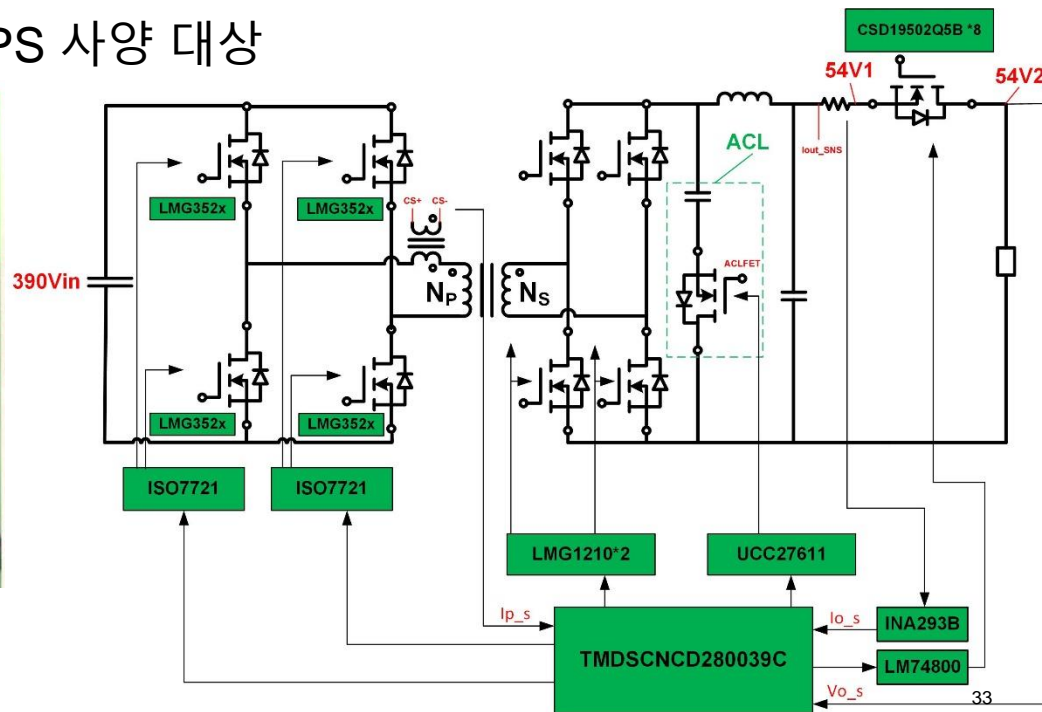
PSFB 설계 예시

PSFB 설계 예: PMP22951

- 입력 전압: $390 V_{nom}$, $340 V_{min}$
- 출력: 최대 54V/3kW, OCP M-CRPS 사양 대상

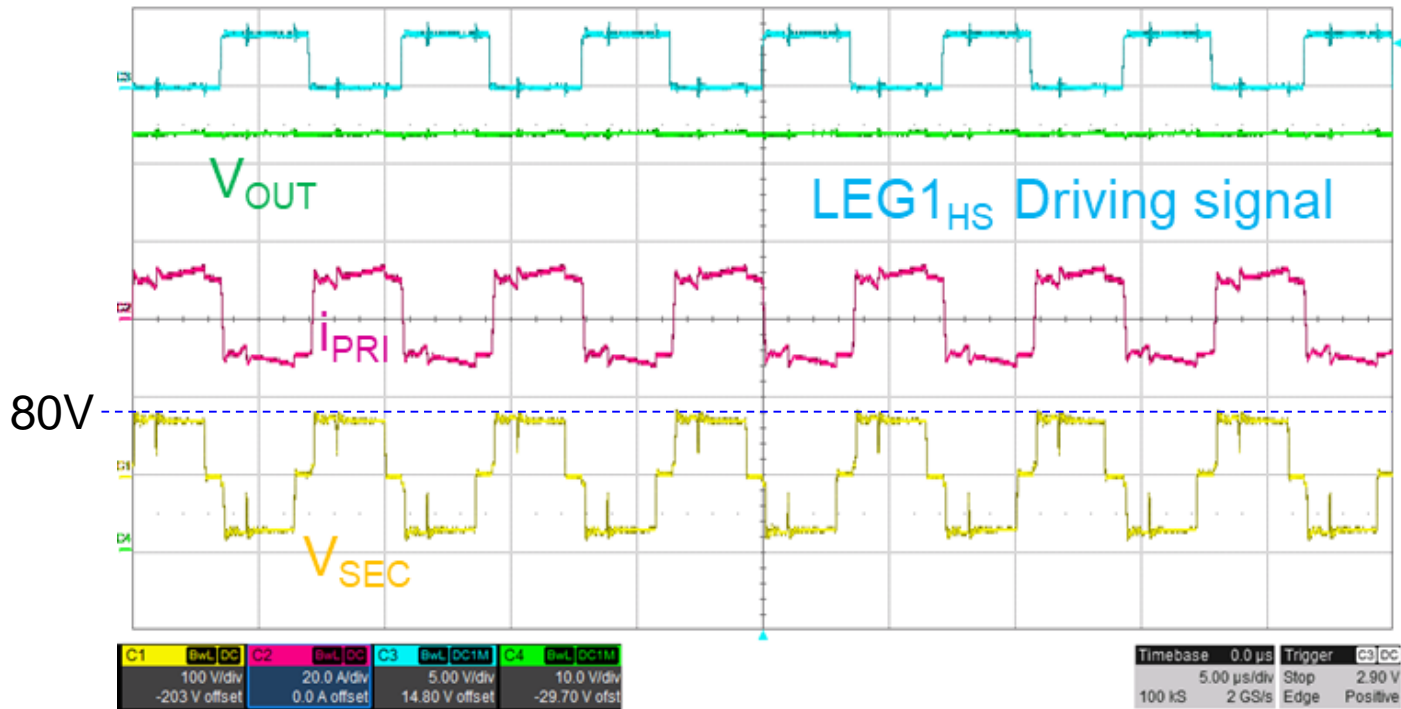


54V, 3kW 위상 편이 풀 브리지(액티브 클램프 레퍼런스 설계



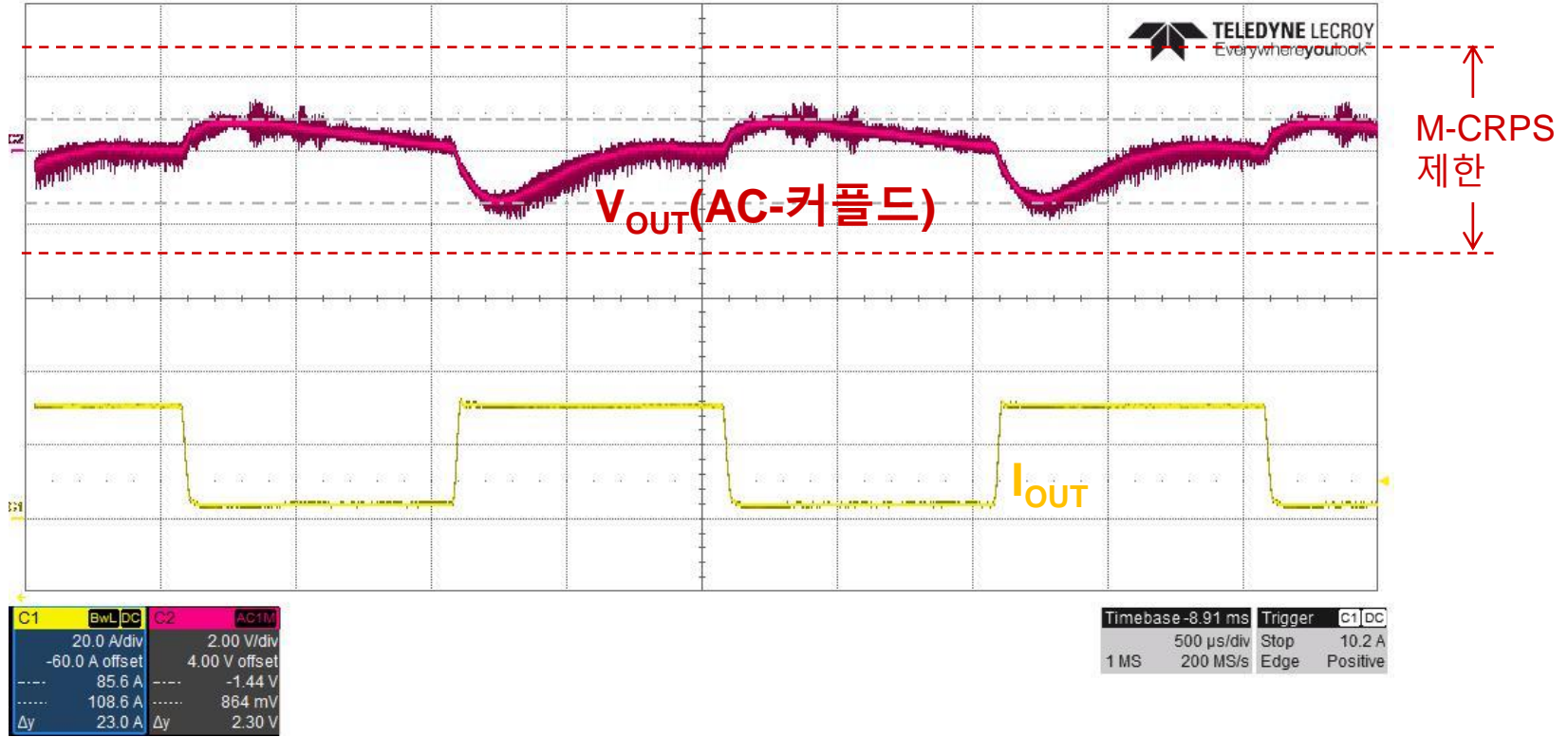
3kW 정상 상태 파형

- 140kHz 작동

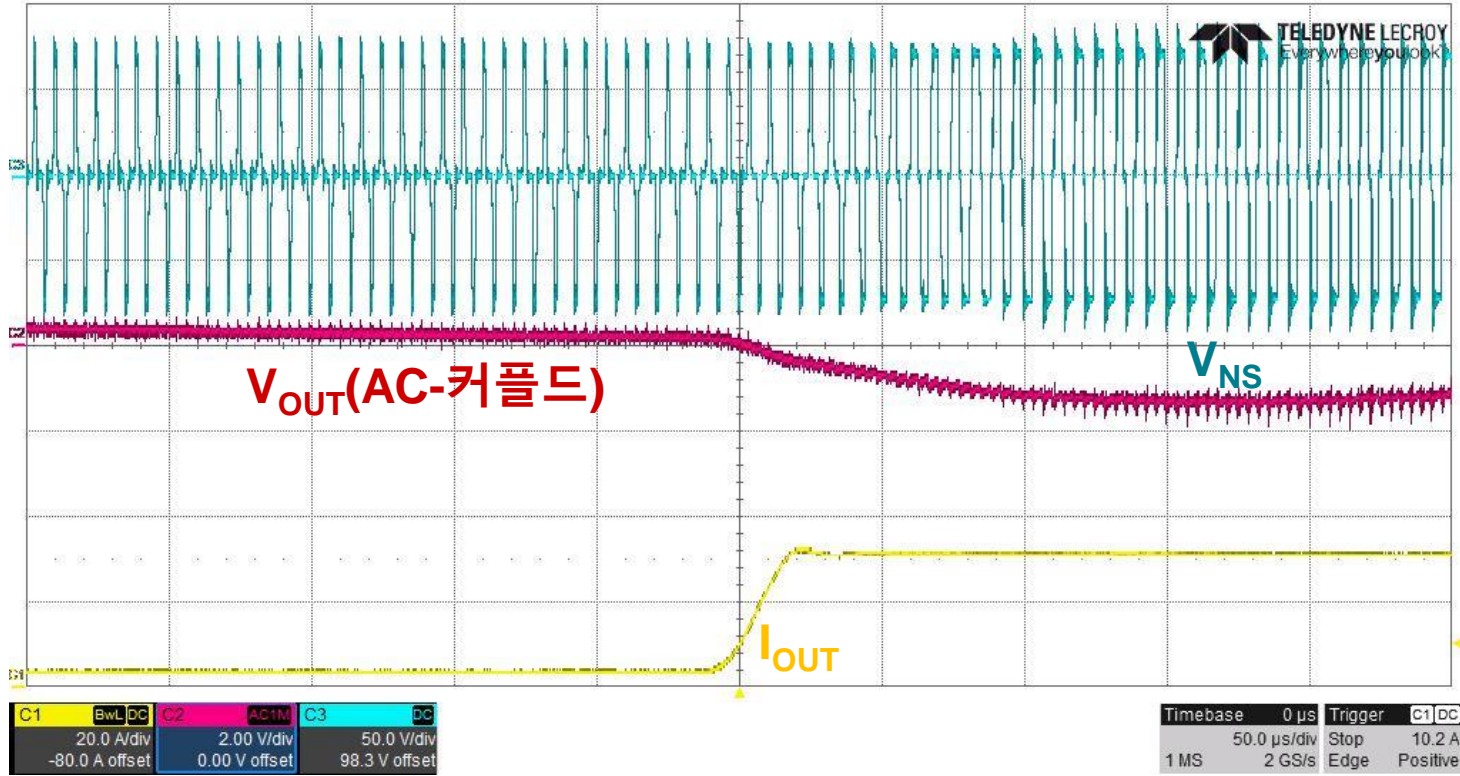


M-CRPS 부하 과도, 50% 부하 단계(3A~31A)

부하 전류



M-CRPS 부하 과도, 50% 부하 단계(3A~31A)



요약

- PSFB는 넓은 입력/출력 전압 범위와 빠른 부하 과도 응답이 필요한 애플리케이션에 적합합니다.
- PSFB 및 기타 절연된 토폴로지 간의 특성
- PSFB 작동 원리
- 다양한 유형의 정류기, 정류기 클램핑 옵션, 제어 모드에 대해 논의했습니다.
- 액티브 클램핑을 통해 M-CRPS 사양을 충족하는 PSFB 레퍼런스 설계를 선보였습니다.
- 다음 슬라이드의 클릭 유도 문안

지금 시작하세요. 전력 추세 및 사양

- **전력의 추세:**

- Yin, Richard. “전원 팁 #109: 서버용 전원 공급 장치 설계의 5가지 주요 동향” EDN 전원 팁 시리즈, 2022년 8월. <https://www.edn.com/five-major-trends-in-power-supply-design-for-servers/>

- **80 Plus 표준:**

- <https://www.clearexult.com/80plus/program-details#program-details-table>

- **OCP M-CRPS 사양:**

- <https://www.opencompute.org/wiki/Server/Working>

- **OCP Open Rack v3 사양:**

- https://www.opencompute.org/wiki/Open_Rack/SpecsAndDesigns

지금 시작하세요. 토폴로지 비교

- **공진형 컨버터와 DAB 비교:**

- Yu, Sheng-Yang, et al. "SiC FET을 사용한 고성능의 양방향 AC/DC 전원 공급 설계"
Texas Instruments Power Supply Design Seminar SEM2400, literature No. SLUP399,
2020. <https://www.ti.com/seclit/ml/slup399/slup399.pdf>

- **공진형 컨버터와 PSFB 비교:**

- Gillmor, Colin. 텍사스 인스트루먼트 동영상 라이브러리의 “고전력 DC/DC 변환을 위한 PSFB와 FB-LLC의 비교”.
- 1부: <https://www.ti.com/video/5979520091001>
- 2부: <https://www.ti.com/video/5980232599001>
- 3부: <https://www.ti.com/video/5980257698001>
- 4부: <https://www.ti.com/video/5980260615001>
- 5부: <https://www.ti.com/video/5980344049001>
- 6부: <https://www.ti.com/video/5980375024001>

지금 시작하세요. PSFB 작동 및 정류기

- **PSFB 작동 및 PSFB 소프트 스위칭 구현 방법:**

- Sabate, J.A., et al. “고전압 고전력 풀 브리지 제로 전압 스위치 PWM 컨버터의 설계 고려 사항.” 진행 중. APEC, 1990, pp. 275-284.

- **PSFB 출력 정류기:**

- Balogh, Laszlo. “전류 더블러 정류기: 푸시풀 및 브리지 컨버터를 위한 대체 정류 기술.” 텍사스 인스트루먼트 애플리케이션 노트, literature No. SLUA121.

<https://www.ti.com/lit/an/sl原因121/sl原因121.pdf>

지금 시작하세요. PSFB 클램핑 옵션

- **패시브 클램프:**

- Lin, Song-Yi, et al. “위상 전환 풀 브리지 ZVS 컨버터의 출력 정류기에서 사용되는 RCD 클램프 적용 스너버에 대한 분석 및 설계.” In IEEE Transactions on Industrial Electronics 45, no. 2 (April 1998), pp. 358-359.

- **1차 클램프:**

- Redl, Richard. “PWM 위상 전환 제어 기능을 갖춘 최적의 ZVS 풀 브리지 DC/DC 컨버터: 분석, 설계 고려 사항 및 실험 결과.” 진행 중. APEC, 1994, pp. 159-165, vol. 1.

- **능동 클램프:**

- Yu, Sheng-Yang, et al. “PSFB 컨버터에서 액티브 클램프로 높은 컨버터 효율 달성.” Texas Instruments Analog Design Journal, literature No. SLYT835, Q1 2023.
<https://www.ti.com/lit/an/slyt835/slyt835.pdf>

지금 시작하세요. PSFB 제어 및 설계 예

- PSFB 제어:

- Wang, Shi-song, et al. “피크 전류 모드 제어 기능을 갖춘 위상 전환 풀 브리지 컨버터의 작은 신호 모델링.” 2020 IEEE ASEM, Tianjin, China, 2020, pp. 1-2.
- Ahmed, M.R., et al. “전류 더블러 정류기가 있는 위상 전환 풀 브리지 컨버터의 전류 모드 컨트롤러를 위한 향상된 모델.” In IEEE ECCE Asia 2019, pp. 3271-3278.
- Vlatkovic V., et al. “위상 전환 PWM 컨버터의 작은 신호 분석.” 발행: IEEE Transactions on Power Electronics 7, issue 1(1992년 1월): pp. 128-135.
- Basso, Christophe. “스위칭 컨버터의 전송 기능.” Faraday Press, 2021.

- 설계 예:

- 능동 클램프가 있는 3kW(400V~12V) 위상 전환 풀 브리지 레퍼런스 설계:
<https://www.ti.com/tool/PMP23126>
- 능동 클램프가 있는 3kW(400V~54V) 위상 전환 풀 브리지 레퍼런스 설계:
<https://www.ti.com/tool/PMP22951>



© Copyright 2024 Texas Instruments Incorporated. All rights reserved.

This material is provided strictly “as-is,” for informational purposes only, and without any warranty.
Use of this material is subject to TI’s **Terms of Use**, viewable at [TI.com](https://www.ti.com)

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