

전기차 충전용 위상천이 폴브릿지 컨버터를 위한 고효율 클램핑 회로

이민수, 최동민, 문건우
KAIST

High Efficiency Clamping Circuit for Phase-Shift Full-Bridge Converters for EV Charging

Min-Su Lee, Dongmin Choi, Gun-Woo Moon
KAIST

ABSTRACT

본 논문에서는 위상천이 폴브릿지(PSFB) 컨버터에 적용할 수 있는 새로운 클램핑 회로를 제안한다. 제안하는 회로가 적용된 PSFB 컨버터는 정류기 다이오드의 전압 발진을 완전히 제거하면서도, 영전압 스위칭(ZVS)을 위한 전류를 보장하기 때문에 전도 손실과 스위칭 손실을 모두 개선하여 고효율을 달성할 수 있다. 뿐만 아니라, 출력 인덕터 부피와 듀티 손실 측면에서도 장점을 갖기 때문에 기존에 제안된 여러 클램핑 회로들에 비해서도 높은 효율과 높은 전력밀도를 갖는다. 제안된 회로의 타당성은 385V 입력, 270~420V 출력의 3.3kW 전기차 충전기 프로토타입으로 검증되었다.

1. 서론

최근 전기자동차(EV) 시장이 본격적으로 활성화됨에 따라, EV 충전기의 고효율 달성은 글로벌 에너지 시장에서 매우 중요한 이슈로 떠올랐다. 이러한 EV 충전기는 그림 1과 같이 정전류(CC), 정전압(CV) 모드 충전 알고리즘에 따라 배터리를 충전하기 때문에 넓은 출력 전압 범위와 넓은 출력 전류 범위에서 충전을 진행해야 한다는 특징을 지닌다. 또한, 이러한 두 가지 충전 모드 중에서, 대부분의 배터리 용량은 CC 모드에서 충전되기 때문에 해당 모드의 효율이 매우 중요하다.^[1]

위상천이 폴브릿지(PSFB) 컨버터는 간단한 구조, 고유 ZVS 특성 및 자화 전류의 오프셋이 없다는 장점에 의해, EV 충전기의 DC-DC 컨버터로서 가장 많이 활용되는 토폴로지 중 하나이다. 하지만 PSFB 컨버터는 정류기 다이오드에서 전압 발진이 발생하며, 이로 인해 다이오드의 전압 스트레스가 매우 높아진다는 단점을 지닌다. 이러한 전압 발진 문제는 EV 충전기와 같은 높은 출력 전압 어플리케이션에서 더욱 치명적인 문제로 작용하며, PSFB 컨버터의 반드시 해결되어야 할 문제 중 하나이다.

해당 전압 발진 문제를 해결하기 위해 최근까지도 여러 클램핑 회로들이 연구되며 정류기 다이오드의 전압 발진을 매우 큰 폭으로 줄였다.^{[2]-[4]} 하지만, 이전의 클램핑 회로들은 CC 모드에서 ZVS 조건이 크게 약화되거나,^{[2]-[3]} 전압 발진을 완전히 제거할 수 없다는 한계점이 존재하기 때문에^{[2], [4]} 결과적으로 컨버터의 효율에 큰 악영향을 끼친다.

따라서 본 논문에서는 그림 2와 같은 새로운 형태의 클램핑 회로를 갖춘 PSFB 컨버터를 제안한다. 제안하는 회로는 전압

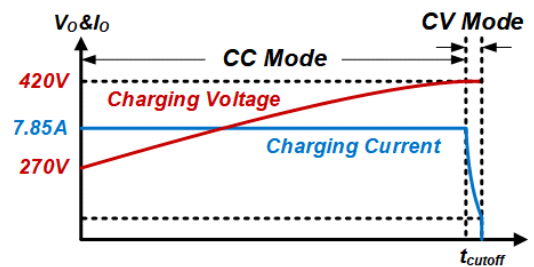


그림 1 3.3kW EV 충전기의 충전 프로파일^[1] (CC-CV 모드)

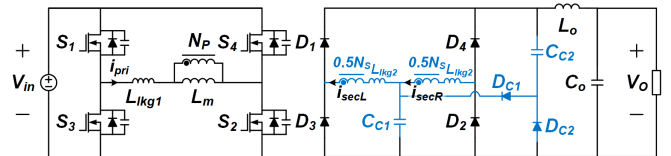


그림 2 단일 커패시터 클램핑 회로가 적용된 PSFB 컨버터

발진을 완전히 제거할 뿐만 아니라, 이전 회로들의 한계점들을 해결한다. 또한, 제안된 회로는 듀티 손실을 줄이고, 작은 부피의 출력 인덕터를 활용할 수 있다는 추가적인 장점 또한 갖기 때문에 효율 측면에서 매우 우수한 성능을 갖는다.

2. 제안된 회로의 동작 분석

그림 3은 제안하는 회로의 동작 파형을 보인다. 해당 회로의 동작은 대칭적으로 동작하기 때문에, 본 논문에서는 스위칭 주기의 절반에 해당하는 5 가지 모드에 대해서만 설명한다. 또한, 제안된 회로의 동작을 간단히 분석하기 위해서 다음과 같은 가정이 적용된다. 1) 스위치는 내부 출력 커패시터와 바디 다이오드를 제외하고 이상적인 NMOS이다. 2) 정류기 다이오드는 접합 커패시터를 제외하고 이상적인 다이오드이다. 3) 클램핑 커패시터 C_c 와 출력 인덕터 L_o 는 매우 크며 각각의 전압, 전류 리플을 무시된다.

모드 1 [$t_0 \sim t_1$]: 해당 모드는 다이오드의 정류가 끝나는 순간 시작되며, 입력 전압원의 전력이 부하로 전달된다. 이 모드에서는 C_{c1} , D_{c1} , C_{c2} 를 지나는 충전 경로가 도통되며, 해당 경로를 통해 누설 인덕터를 지나지 않는 클램핑 경로가 형성된다. 따라서 다이오드의 전압은 $V_{Cc1} + V_{Cc2}$ 로 완전히 클램핑된다.

모드 2 [$t_1 \sim t_2$]: 해당 모드는 진상 스위치 S_1 , S_3 가 스위칭될 때 시작된다. 이 모드에서 회로의 1차측은 프리휠링을 시작하지만 $V_{Cc1} + V_{Cc2}$ 의 전압은 여전히 L_o 에 인가되어 전류를 증가시

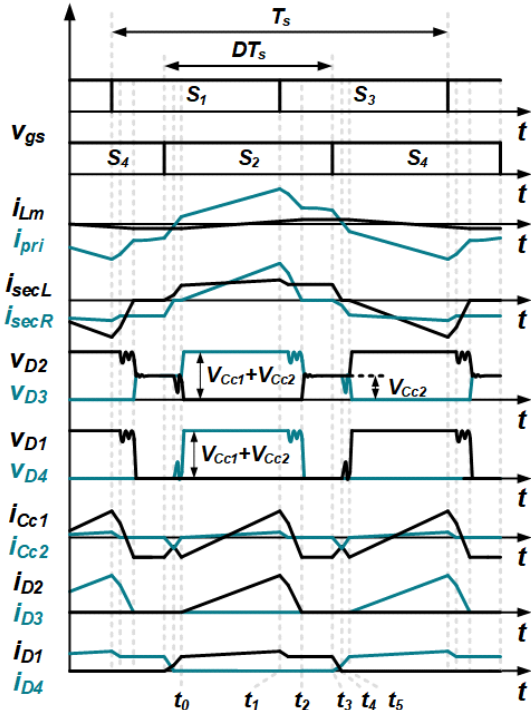


그림 3 제안하는 회로의 동작 파형

킨다. 또한, 이 모드에서는 클램핑 커패시터 전압이 1차측으로 전달되므로 프리휠링 전류가 감소한다.

모드 3 [$t_2 \sim t_3$]: 해당 모드는 C_{C1} 및 C_{C2} 를 충전하기 위한 전류들이 더 이상 흐르지 않을 때 시작되며, 본격적인 프리휠링 구간으로 동작한다. 하지만, 여전히 V_{Cc2} 가 L_o 에 인가되고, i_{secL} 을 통해 기존의 절반의 프리휠링 전류가 1차 측으로 흐른다.

모드 4 [$t_3 \sim t_4$]: 해당 모드는 지상 스위치 S_2 , S_4 가 스위칭 되면 시작된다. 이 모드에서는 입력 전원이 이전과 역방향으로 인가되고 다이오드들의 정류가 시작된다. 해당 정류 전류는 C_{C2} 의 방전 경로로 전해지며, V_{Cc1} 과 V_{Cc2} 의 전압이 변압기에서 상승되며 변압기 양단의 전압은 0이 된다. 따라서 이 모드에서는 여전히 프리휠링 구간처럼 동작하며, 듀티 손실이 감소된다.

모드 5 [$t_4 \sim t_5$]: 다이오드 정류가 진행됨에 따라서 i_{D1} 이 0이 되면 해당 모드가 시작한다. 이 모드에서 C_{C2} 의 방전 전류는 모두 D_{R2} 로 정류되며, i_{Cc2} 의 전류가 0에 도달하면 해당 모드가 종료되며 나머지 반주기가 반복된다.

3. 특징 분석

3.1 전압 클램핑

그림 4에서 보이는 바와 같이 제안하는 회로는 C_{C1} , D_{C1} , C_{C2} 경로를 통해 누설 인덕터를 거치지 않는 클램핑 경로를 형성한다. 이로 인해, 참조 [2], [4]의 회로와는 다르게 전압 발진을 완전히 제거하며, 역회복 특성에 따른 추가 전압 오버슈트에도 안정적이다. 따라서 제안하는 회로는 순방향 전압강하가 낮은 Si 다이오드를 활용할 수 있어, 효율을 높일 수 있다.

3.2 출력 인덕터

앞서 2장에서 언급한 바와 같이 제안하는 회로는 프리휠링 구간에도 V_{Cc2} 의 전압이 L_o 에 인가되므로 전체 구간에서 L_o 에 걸리는 전압 리플이 기존의 PSFB 컨버터에 비해 감소된다. 제

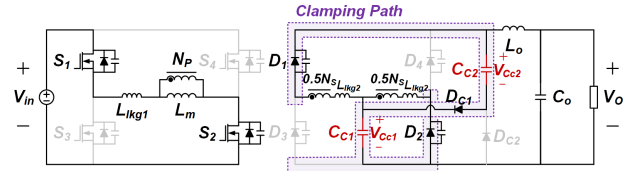


그림 4 제안하는 회로의 다이오드 클램핑 경로

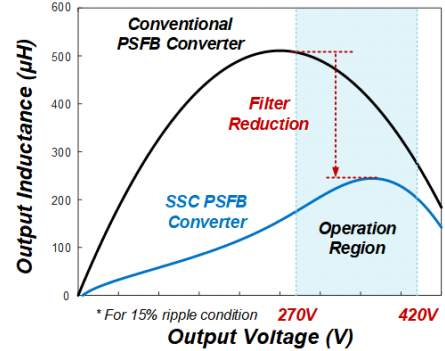


그림 5 출력 전압에 따른 출력 인덕턴스

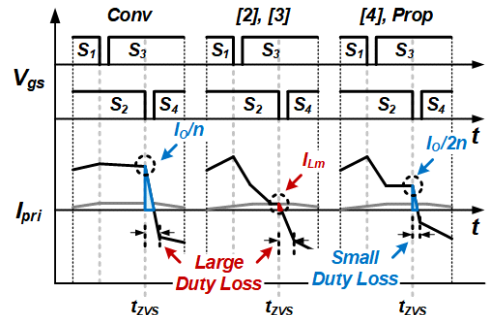


그림 6 제안하는 회로의 ZVS 에너지 및 듀티 손실

안하는 회로와 기존 PSFB 컨버터의 출력 전압 범위에 따른 출력 인덕턴스 값을 비교한 그래프가 그림 5에 나타나 있다. 전체 동작 구간에서 제안하는 회로는 절반의 출력 인덕턴스를 갖는 것을 알 수 있으며, 다른 조건이 모두 동일하다면 출력 인덕터의 부피를 절반에 가까이 활용할 수 있다.

3.3 듀티 손실

듀티 손실이란 2장에서 나타난 정류 기간 (=모드 4, 5)에 해당하는 구간이며, 0.5의 최대 듀티를 인가하여도 최대전압이득을 낼 수 없는 영역을 의미한다. 따라서 회로의 듀티 손실을 단축시키는 것은 전압 이득의 활용에 매우 중요하다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 기존 PSFB 컨버터와 참조 [2]-[3]의 컨버터는 모두 큰 듀티 손실을 가지는 반면, 제안하는 회로는 상대적으로 작은 듀티 손실을 가지고 있다. 따라서 보다 높은 전압 이득까지 활용할 수 있기 때문에 넓은 전압 이득 조건에 유리하다는 장점을 지닌다.

3.4 ZVS 조건

그림 6에서 나타난 바와 같이 [2]-[3]의 클램핑 회로는 프리휠링 전류를 완전히 제거하는 특성에 의해서 전 구간에서 ZVS가 매우 악화되므로 추가적인 설계조건 (ex. 낮은 L_m)이 필요하며 이는 전체 효율을 악화시킨다. 하지만 제안하는 회로는 절반의 프리휠링 전류가 남아 있으므로 이를 통해 CC 모드의 전 구간에서 ZVS가 달성가능하며, CC 모드는 충전의 대부분을 차지하므로 충전의 대부분의 구간에서 ZVS가 가능하다.

표 1 각 프로토타입의 설계된 소자 값

	기존 PSFB 컨버터	[2] 컨버터	[4] 컨버터	제안하는 회로
1차측 스위치	IPP60R074C6 ($V_{ds} = 600 \text{ V}$, $I_D = 31.6 \text{ A}$, $R_{ds,on} = 74 \text{ m}\Omega$, $C_{o(er)} = 150 \text{ pF}$)			
변압기	PQ4040 (1 mH, 24 : 16 : 16)	PQ4040 (180 μH , 25 : 17 : 17)	PQ4040 (1 mH, 24 : 16 : 16 turns)	
추가 인덕터	PQ2620 (8 μH)	PQ2625 (16 μH)		
정류기 다이오드	IDH15S120 (1200 V SiC, 1.75V _F)	IDH10G65C6 (650 V SiC, 1.25V _F)		MUR1560 (600 V Si, 0.8V _F)
클램핑 회로	-	IDH10G65C6 ($\times 2$) (650 V SiC, 1.25V _F) PCX2 337F60684 (Film Cap, 0.68 $\mu\text{F} \times 2$)	PCX2 337F60684 (Film cap, 0.68 $\mu\text{F} \times 2$)	MUR1540 ($\times 2$) (400 V Si, 0.6V _F) PCX2 337F60684 ($\times 2$) (Film cap, 0.68 $\mu\text{F} \times 2$)
출력 인덕터	CH358060 ($\times 2$) (500 μH , 67 turns)	CH358060 (250 μH , 67 turns)		

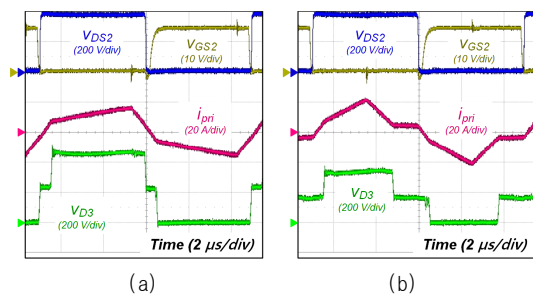


그림 7 제안하는 회로의 실험 파형 (a) 420V, 7.85A 출력 (b) 270V, 7.85A 출력

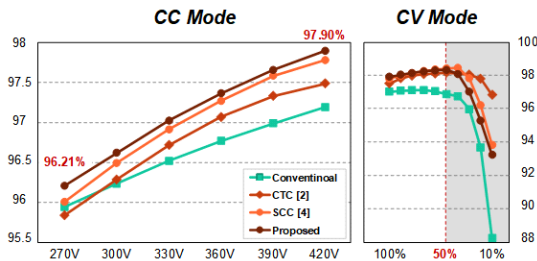


그림 8 CC-CV 모드 조건에서의 측정 효율

4. 실험 결과

제안된 회로의 유효성을 확인하기 위해, 385 V 입력, 270-420 V 출력 및 100 kHz 스위칭 주파수를 갖는 3.3 kW EV 충전기 프로토타입들을 제작하고 검증하였다. 이전의 회로들과 제안하는 회로는 표 1에 명시된 설계 부품으로 제작되었으며, 모든 프로토타입의 소자는 CC 모드에서 ZVS가 달성 가능하며, 듀티 손실이 동일하도록 선정되었다.

그림 7은 제안하는 회로의 실험 파형이다. 제안하는 회로는 Si 다이오드를 활용함에도 불구하고 다이오드의 전압발진이 완전히 제거되는 것을 확인할 수 있으며, 프리휠링 전류가 남아 있어 ZVS가 가능한 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 CC-CV 모드 조건에서의 측정효율이며, 배터리 충전의 대부분을 차지하는 CC모드의 전 구간에서 제안하는 회로는 최고 효율을 달성 할 수 있는 것을 알 수 있다.

비록 CV 모드의 경우하로 갈수록 제안하는 회로는 [2], [4]의 회로보다 효율이 낮아지지만 그림 1에서 나타난 바와 같이 해당 경우하 구간은 전체 배터리 충전에 거의 영향을 주지 않으므로, CC 모드에서 최고 효율을 달성하는 제안하는 회로가

EV 충전 조건에서 최고 효율을 달성할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 EV 충전기용 PSFB 컨버터를 위한 새로운 클램핑 회로가 제안되었다. 제안하는 회로는 CC 모드에서 ZVS를 보장하며, 전압 발진을 완전히 제거할 뿐만 아니라, 작은 듀티 손실을 가지고 작은 부피의 출력 인덕터를 활용할 수 있다. 따라서 제안하는 회로는 고효율과 고밀도화 달성에 적합한 클램핑 회로로써, EV 충전기뿐만 아니라 PSFB 컨버터를 활용하는 다양한 산업군에서 활용할 수 있을 것이다.

이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2019R1A2B5B02070509)

참고 문헌

- [1] M. Shirk, J. Wishart, "Effects of Electric Vehicle Fast Charging on Battery Life and Vehicle Performance," in proc. SAE 2015 World Congress & Exhibition, no. 2015-01-1190, 2015.
- [2] C. Y. Lim, Y. Jeong and G. W. Moon "Phase-Shifted Full-Bridge DC-DC Converter With High Efficiency and High Power Density Using Center-Tapped Clamp Circuit for Battery Charging in Electric Vehicles," IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 11, pp. 10945-10959, Nov. 2019.
- [3] B. Gu, J.-S. Lai, N. Kees, and C. Zheng, "Hybrid-switching full-bridge dc-dc converter with minimal voltage stress of bridge rectifier, reduced circulating losses, and filter requirement for electric vehicle battery charges," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 3, pp. 1132 - 1144, Mar. 2013.
- [4] M. S. Lee, C. Y. Lim, K. W. Kim, M. H. Park and G. W. Moon, "A Phase-Shift Full-Bridge Converter with Novel Voltage Oscillation Clamping Circuit for Electric Vehicle On-Board Charger," in proc. ICPE 2019-ECCE Asia, 2019, pp. 2040-2045.