

양방향 DC-DC컨버터를 위한 무손실 스너버

박철완, 금문환, 한상규†
국민대학교 PEOSLA

Lossless Snubber for Bidirectional DC-DC Converter

Chul Wan Park, Keum moon hwan, Sang Kyoo Han†
Power Electronic Laboratory, Kookmin University

ABSTRACT

본 논문은 양방향 컨버터에 적용 가능하며 스위칭 손실을 저감할 수 있는 새로운 무손실 스너버를 제안한다. 제안 방식은 스위칭 특성을 개선하기 위하여 스위치 턴 온 시 전류의 기울기를 낮추고, 스위치 오프 시 전압의 기울기를 낮춰 스위칭 시 전압과 전류가 겹침으로써 발생하는 손실을 최소화 하여 고 주파수 구동에 유리한 장점을 갖는다. 또한 양방향 컨버터에서 사용되는 보조스위치의 전류가 서서히 감소하도록 하여 body diode에서 발생하는 역 회복 문제를 획기적으로 해결할 수 있다. 제안회로의 타당성 검증을 위하여 이론적 해석 및 Simulation 결과를 제시한다.

1. 서론

최근 하이브리드 자동차에서 연비 향상 또는 EV(Electric Vehicle)모드의 증가, 가속성능 및 등판능력 향상 등의 목적을 위해 모터의 출력이 증대되는 추세이다. 이를 위해서는 대전류 모터보다 고전압 모터의 사용이 효율적이고 사이즈 측면에서 이점이 있다. 따라서 고전압 모터를 구동하기 위해서는 배터리 전압을 상향시키는 방법과 배터리와 모터 구동용 인버터 사이에 양방향 컨버터를 사용하는 방안이 있다. 전자의 경우, 높은 전압을 얻을 수 있지만 직렬로 적층되는 배터리 셀 수 증가에 따라 셀간 Balance문제와 배터리 전압이 출력전력 및 배터리 SOC에 따라 변동하는 문제로 전압상향효과를 반감시키게 된다. 후자의 경우 컨버터단의 추가로 부가적인 손실이 필연적이나 배터리 셀을 증가시킬 필요가 없고 배터리와 인버터단의 독립적인 설계가 가능하여 전자에 비해 매우 효과적이다. 하지만 기존에 사용되는 양방향 컨버터의 경우 인덕터 및 출력 캐패시터의 용량 및 체적이 매우 크기 때문에 고 주파수 구동을 통하여 이를 해결할 수 있으나 하드스위칭 동작에 따라 구동 주파수에 비례하여 스위칭 손실이 발생하기 때문에 5kHz~15kHz수준의 구동주파수 대역의 한계를 갖는다. 이러한 단점들을 해결하기 위하여 기존에 다양한 방식이 제안된 바 있지만 대부분 양방향 컨버터에 적용되지 못하고 단방향에 한하여 적용이 가능했다.^[1] 따라서 본 논문에서는 스위칭 특성을 개선하고 양방향 컨버터에 적용할 수 있는 새로운 무손실 스너버를 제안한다.

2. 제안된 무손실 스너버

그림 1은 제안된 무손실 스너버가 적용된 양방향 컨버터를 나타내고 있으며 기존 양방향 컨버터와 같이 충전 시 벡 컨버터 모드로, 방전 시에는 부스트 컨버터 모드로 동작한다.^[2] 제안 무손실 스너버의 경우 그림 1과 같이 양방향 컨버터에 커플드 인덕터(T_1), 스너버 캐패시터(C_{s1} , C_{s2}) 및 소수의 다이오드를 추가하여 스위치 턴 온 및 오프 과도구간동안 전류와 전압의 기울기를 낮춤으로써 소프트 스위칭 동작이 가능하도록 하였다.

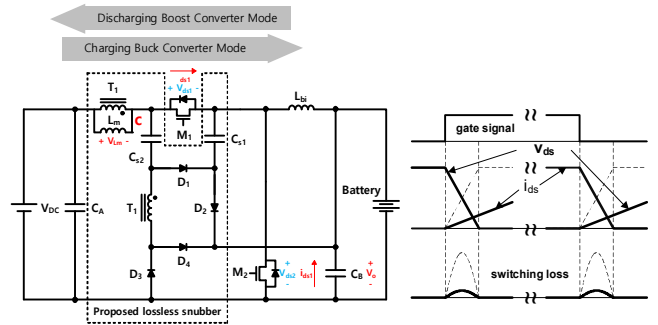


그림 1 제안회로도 및 소프트 스위칭 주요 파형
Fig. 1 Proposed Circuit and Ky waveform of Soft Switching

뿐만 아니라, 스위치 턴 오프 시 커플드 인덕터 T_1 에 의해 동기정류기로 동작하는 스위치의 전류가 서서히 감소하도록 할 수 있어 동기정류기의 Body Diode에서 발생하는 역 회복 문제를 획기적으로 해결할 수 있다. 특히 상기 소프트 스위칭 동작이 기존 무손실 스너버의 경우 단방향 컨버터에만 적용 가능하였으나 제안된 무손실 스너버의 경우 양방향 동작 시 모두 소프트 스위칭이 가능한 장점을 가진다.

그림 2는 양방향 컨버터의 모드별 주요 동작파형을 보이고 있다. 양방향 컨버터의 충전 및 방전모드는 각각 입력과 출력이 서로 반대이며 벡 컨버터 모드와 부스트 컨버터 모드로 동작한다.

2.1 벡 모드 시 제안된 무손실 스너버의 동작원리

벡 컨버터 모드에서 주 스위치로 동작하는 M_1 스위치의 경우 턴 오프 시 커플드 인덕터 T_1 의 전류가 다이오드 D_1 , D_3 를 통해 C_{s1} 의 전압을 서서히 반전시키기 때문에 C_{s1} 과 C_{s2} 전압에 의하여 결정되는 스위치 M_1 의 양단전압 역시 서서히 변화하게 된다. 특히 이 구간에서 스위치 전류는 급격하게 감소하지만 스위치의 양단전압은 상기한 바와 같이 서서히 증가하므로 소프트 턴 오프가 가능하다. 한편 M_1 스위치 턴 온 시에는 스위치 양단전압은 급격히 감소하나 M_1 스위치와 직렬 연결되어 있는 커플드 인덕터의 자화인덕터 (L_m)에 의하여 스위치 전류는 서서히 증가하므로 스위치 전압과 전류의 중첩에 의한 스위칭 손실은 대폭 감소될 수 있다. 이와 동시에 그림 2에 표시되지 않았으나 실제로 스위치 M_1 과 M_2 사이에는 Dead time이 존재하므로 이 기간 동안 출력 인덕터 전류는 M_2 의 Body diode를 통해 환류하고 있다. 따라서 무손실 스너버가 없는 양방향 컨버터의 경우 스위치 M_1 이 턴 온 되면 스위치 M_2 의 Body diode에는 역 회복 문제가 발생될 수 있으나 제안된 무손실 스너버의 커플드 인덕터로 인해 스위치 M_2 의 전류를 서서히 감소시키므로 상기 문제를 획기적으로 해결할 수 있다.

2.2 부스트 모드 시 제안된 무손실 스너버의 동작원리

부스트 컨버터 모드에서는 벅 컨버터 모드와 반대로 입력과 출력이 반전되어 벅 컨버터 모드에서 출력인덕터로 동작했던 인덕터(L_{bi})가 입력인덕터가 되고, M_2 스위치가 주 스위치로 동작하며 M_1 스위치는 보조 스위치로 동작한다. 스위치 M_2 의 경우 스위치가 턴 온 될 때 출력전압에 의하여 자화 인덕터(L_m)의 전류는 선형적으로 감소하지만 입력 인덕터(L_{bi})의 전류가 입력전압에 의하여 선형적으로 증가하기 때문에 주 스위치 M_2 의 전류가 서서히 증가하게 된다. 이 때 보조스위치 M_1 은 자화 인덕터(L_m)와 같은 전류가 흐르므로 전류가 서서히 감소하여 역 회복 문제 해결이 가능하다. 턴 오프 구간에서는 입력 인덕터(L_{bi}) 전류가 C_{s1} 을 방전하여 전압이 서서히 변화하기 때문에 주 스위치의 양단전압이 서서히 변화하여 스위칭 손실이 저감될 수 있다. 따라서 벅 컨버터 모드와 부스트 컨버터 모드에서 모두 스위칭 손실을 저감할 수 있다.

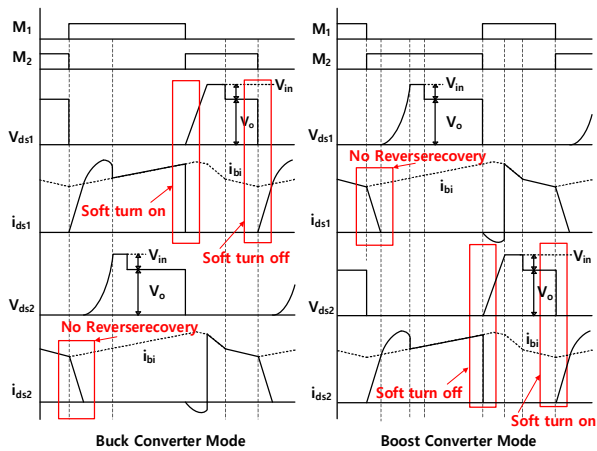


그림 2 제안회로의 주요 동작파형
Fig. 2 Key operational waveforms of proposed circuit

3. 제안회로 실험 결과

제안회로의 타당성 검증을 위하여 제안된 무손실 스너버를 적용한 500W급 양방향 컨버터에 대해 PSIM을 이용한 Simulation을 수행하였다. Simulation시 주요 사양은 표 1과 같으며 모의실험 결과는 그림 3과 같다.

표 1 실험사양 및 주요소자 파라미터
Table 1 Experiment Specification and Parameter

V_{in}	Buck	100V	Coupled inductor (N1:N2)	1:1
	Boost	50V	L_m	5 μ H
P_{out}		500W	L_{bi}	100 μ H
C_{s1} / C_{s2}		27nF / 1 μ F	Switching Frequency	100kHz

실험결과를 통하여 벅 컨버터 모드 및 부스트 컨버터 모드에서 모두 주 스위치의 전류 및 전압기울기를 낮춰 상기 제시된 바와 같이 전압과 전류의 증첩에 의한 스위칭 손실이 저감되어 스위칭 특성이 개선되는 것을 확인 하였다. 또한, 보조 스위치 턴 오프 시 전류가 서서히 감소하여 스위치 내부 다이오드에서 발생할 수 있는 역 회복 특성이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 제안방식의 실험결과를 통하여 스위치 턴 온 및 오프 과도구간동안 발생하는 스위칭 손실이 대폭 저감되며 역 회복 특성이 개선되기 때문에 고 주파수 구동을 통한 회로 고밀도화 구현의 가능성을 확인하였다.

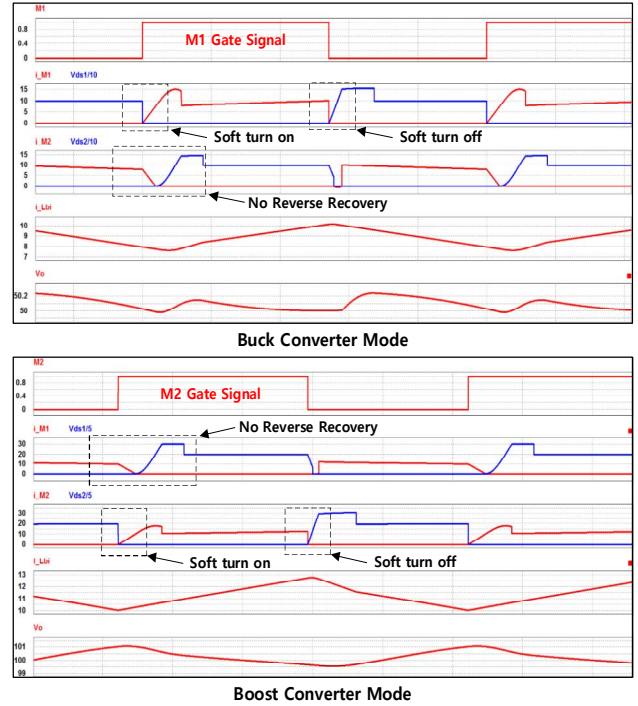


그림 3 Buck Converter mode시 스위치 주요 동작파형
Fig. 3 Switching waveform in Buck Converter mode

4. 결론

본 논문에서는 양방향 컨버터에 적용 가능한 새로운 무손실 스너버를 제안하였다. 제안회로는 양방향 컨버터에 추가된 스너버 셀로 인하여 스위칭 구간동안 전압 및 전류의 기울기를 낮춰 기존방식에 비하여 스위칭 손실을 최소화 할 수 있는 장점을 갖는다. 따라서 고 효율 획득이 가능하고 주파수 상승이 용이하여 회로 내 리액티브소자 사이즈를 최소화 할 수 있는 장점을 갖는다. 뿐만 아니라 제안 방식을 통하여 전류 및 전압의 기울기가 낮아지기 때문에 EMI측면에서도 부가적 이점을 얻을 수 있다. 본 제안방식의 타당성을 검증하기 위하여 Simulation을 통하여 충전 및 방전모드에서 스위칭이 개선되는 것을 확인하였다. 특히, 본 제안방식은 기존의 무손실 스너버가 충전 또는 방전모드 중 한 모드에 대해서 스위칭 특성을 개선하는데 반하여 양방향 모두에서 스위칭 특성의 개선이 가능하다는 점에서 고 효율 및 고 밀도 양방향 컨버터 구현이 가능할 것으로 기대된다.

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2015년도 민관 공동 투자기술 개발사업(S2252926)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참고 문헌

- [1] E. Sanchis Kilders, A. Ferreres, E. Maset, J. B. Ejea, V. Esteve, J. Jordan, A. Garrigos, and J. Calvente, "Soft switching bidirectional converter for battery discharging charging," Proceedings of the IEEE Conf., pp. 603-609, 2006.
- [2] Pritam Das, Brian Laan, Seyed Ahmad Mousavi, and Gerry Moschopoulos, "A Nonisolated Bidirectional ZVS PWM Active Clamped DC DC Converter", Proceedings of the IEEE, Vol. 24, No. 2, pp. 553-558, 2009, February.