

절연형 양방향 DC-DC 컨버터의 초기 기동 방법

주동명, 노용수, 현병조, 박준성, 김진홍
전자부품연구원 지능메카트로닉스 연구센터

Start-up solutions for bi-directional isolated DC-DC Converter

Dong-Myoung Joo, Yong-Su Noh, Byong Jo Hyon, Joon Sung Park, Jin-Hong Kim
Korea Electronics Technology Institute (KETI)

ABSTRACT

본 논문에서는 고전압-저전압 간 인터페이스에 활용되는 절연형 양방향 컨버터를 분석한다. 양방향 컨버터의 가능한 토폴로지 및 실제 구현시 발생할 수 있는 문제점 및 해결방안을 고찰하고 이를 시뮬레이션으로 검증한다.

1. 서론

에너지 저장 시스템(ESS), 친환경자동차(xEV), 무정전 전원 시스템(UPS), 신재생 발전 시스템 및 배터리 충방전 시험 장치 등 다양한 응용 분야에서 다양한 전압 범위의 배터리가 동시에 사용되고 있다. 따라서 수백V급의 고전압 배터리 및 수십V급의 저전압 배터리 사이의 상호 인터페이스를 위한 절연형 양방향 DC-DC 컨버터가 연구 및 개발되고 있다^[1].

Dual active bridge 컨버터, CLLC 컨버터 등 다양한 절연형 양방향 DC-DC 컨버터 토폴로지 중 Phase-shifted full bridge(PSFB) 컨버터는 1차측 스위치의 ZVS turn-on, 넓은 입력 전압 범위 및 2차측 전압제어가 간단함 등의 장점을 가지는 장점이 있다. 양방향 PSFB 컨버터가 2차측에서 1차측으로 승압 동작을 하는 경우 절연형 Boost 컨버터와 동일하게 해석할 수 있다. 이 때 1차측 DC-link 커패시터가 방전되어 있는 경우 돌입전류에 의한 문제가 발생하므로 초기 기동 시 대책이 반드시 필요하다^[2]. 본 논문에서는 다양한 방법 중 Flyback 권선을 적용하고 이를 시뮬레이션 및 실험으로 검증한다.

2. 본론

2.1 PSFB 컨버터의 승압 모드 분석

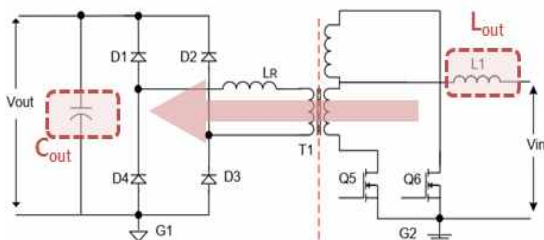


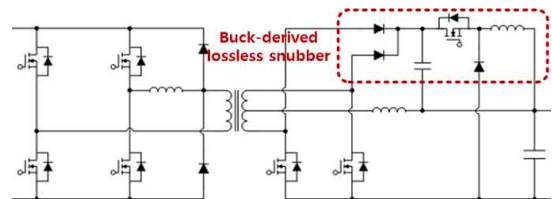
그림 1 PSFB 컨버터의 승압 동작 모드
Fig. 1 A Boost operation mode of PSFB converter

그림 1은 Center tap 동기 정류 스위치(Q5, Q6)가 적용된 PSFB 컨버터의 승압 동작 모드를 나타낸다. Q5 및 Q6은 180° 위상차를 갖는 구동 신호에 의해 제어되며 1차측 스위치(D1-D4는 다이오드 정류기로 동작한다. Q5 및 Q6 스위치의 Duty 비 D가 0.5 이상인 경우, 한 주기에 최소한 하나의 스위치가 On 되어 있으므로 출력 인덕터 Lout에 흐르던 전류의 환류 경로가 존재하며, 해석은 Boost 컨버터의 동작과 동일하다. 이 때 $D \geq 0.5$ 에서 동작할 수 있는 고전압 단의 최소 전압은 식 1과 같다.

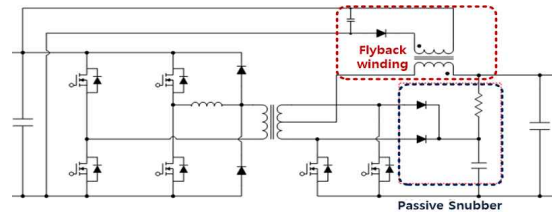
$$V_{pre} = \frac{N_p}{N_s} * V_{in} \tag{1}$$

반면 D가 0.5 미만인 경우 Q5 및 Q6이 모두 off되는 시점이 발생하며, 이 때 Lout에 흐르는 전류의 환류 경로가 없으므로 정상적인 동작이 불가능하다. 또한 릴레이 등으로 고전압 배터리가 고전압 단 DC-link 커패시터와 분리되어 전압이 0인 상태에서 0.5 이상의 D로 동작을 시작하는 경우 매우 큰 돌입전류가 발생한다. 따라서 D를 0부터 증가시키면서 출력 인덕터의 환류 경로를 제공해줄 수 있는 초기 기동 방법이 필요하다.

2.2 PSFB 컨버터의 승압 모드 기동 방법



(a) Buck-derived lossless snubber solution



(b) Flyback winding solution

그림 2 PSFB 컨버터의 승압 모드 기동 회로
Fig. 2 A start-up circuit of PSFB converter for boost mode operation

그림 2는 승압 모드 시 $D < 0.5$ 구간에서 동작이 가능한 PSFB 컨버터의 가능한 토폴로지를 나타낸다. 그림 2-(a)의 무손실 스너버는 Lout의 스위치의 Off 구간 동안 인덕터의 에너지

를 스너버 커패시터에 저장하고, 이를 Buck 컨버터를 통해 전원으로 되돌린다. 이 방법은 효율 측면의 이점과 더불어 강압 동작 시에도 무손실 스너버를 통해 2차측 스위치의 V_{ds} Spike를 저감할 수 있다. 그러나 Snubber MOSFET의 제어 및 구동회로가 필요하고, $D < 0.5$ 이하에서 모든 L_{out} 의 에너지를 스너버가 감당해야 하므로 초기에 스너버의 부담이 매우 크다.

그림 2-(b)에 나타난 L_{out} 에 Flyback winding을 추가하는 방법은 $D < 0.5$ 이하에서 Q_5 및 Q_6 이 모두 off 되었을 때 Flyback 컨버터와 같이 1차측으로 전력을 전달한다. 이 방법은 2차측 스위치의 Off 시 Flyback 컨버터와 마찬가지로 누설 인덕턴스에 의한 V_{ds} spike 문제가 발생하며, 이를 관리하기 위해 Passive RCD Snubber가 반드시 필요하다. 그러나 무손실 스너버 방법 대비 하드웨어 및 제어 측면에서 구현이 간편한 장점이 있다.

2.3 시뮬레이션 비교

표 1은 각 방법을 시뮬레이션 했을 때의 주요 파라미터를 나타낸다. 입력 전압은 저압 배터리를 고려하여 14.5V, 고전압 단 충전 전압은 100cell 배터리를 기준으로 하여 430V로 설정하였다.

표 1 승압 모드 시뮬레이션 주요 파라미터
Table 1 Key parameters for simulation for boost mode

파라미터	값	단위
저전압 단 입력 전압	14.5	V
고전압 단 충전 전압	430	V
저전압 단 평균 입력 전류	100	A

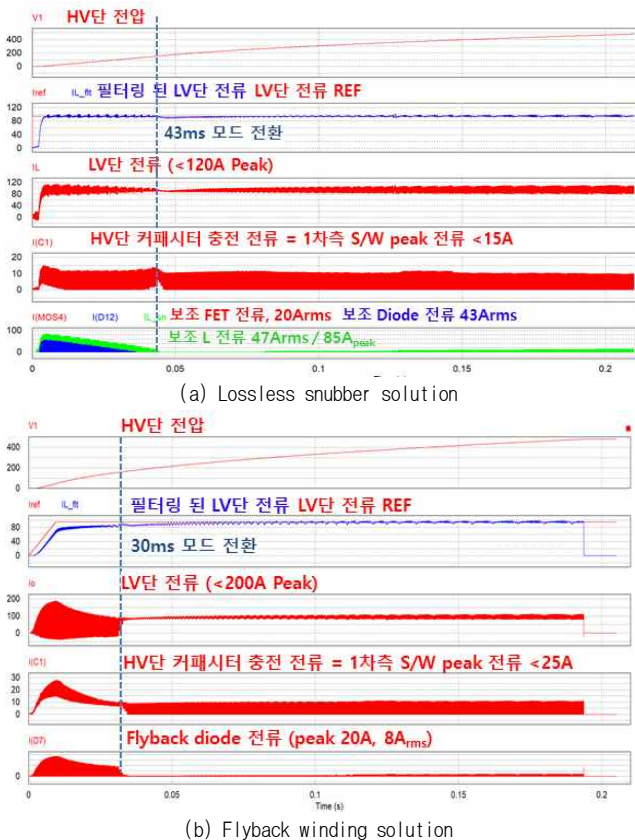


그림 3 기동 방법 별 시뮬레이션의 주요 파형
Fig. 3 Key waveforms of start-up solution simulations

그림 3은 각 방법 별 주요 시뮬레이션 파형을 나타낸다. 무손실 스너버 방법은 $D < 0.5$ 이하인 구간(약 43ms) 동안 무손실 스너버에서 L_{out} 의 에너지를 스너버가 감당해야 하므로 초기에 스너버의 스위치, 다이오드 및 보조 인덕터의 전류 부담이 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 특히 스위치와 다이오드는 매우 작은 시간만 전류를 흘리면 되므로 정격을 작게 할 수 있다. 반면 인덕터는 Peak 전류에서도 포화되지 않아야 하므로 반드시 Peak 전류 스펙 이상으로 설계되어야 한다.

Flyback winding 방법은 $D < 0.5$ 구간에서 항상 전력이 1차측으로 전달되므로(On시 주 변압기/Off시 Flyback winding) 기동 시간이 짧으며(약 30ms) 추가적인 하드웨어가 없으므로 구현이 간편하다. 따라서 본 논문에서는 이 방법을 적용하고 실험을 통해 검증하였다.

2.4 Flyback winding 방법 실험

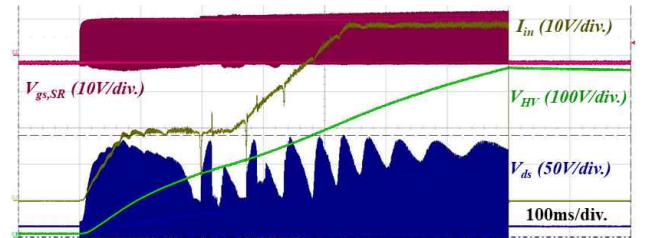


그림 4 Flyback winding을 통한 승압 모드 기동 시의 주요 파형
Fig. 4 Key waveforms of boost mode start-up with flyback winding

그림 4는 flyback winding 방법을 적용했을 때의 승압 모드 기동 시의 주요 파형을 나타낸다. 초기 기동에 의해 돌입 전류 없이 고전압 단 전압이 증가하고 있음을 확인할 수 있다. $D < 0.5$ 구간인 Flyback 동작 구간에서는 누설 인덕턴스에 의한 동기 정류 스위치의 V_{ds} spike에 따라 최대 전류가 제한되므로 권선 시 누설 인덕턴스의 최소화가 필요하다.

3. 결론

본 논문에서는 PSFB DC-DC 컨버터의 승압 모드 시 무손실 스너버 방법 및 Flyback winding 방법을 적용한 초기 기동 방법을 분석하고 시뮬레이션을 통해 특성을 확인하였다. 또한 Flyback winding 방법을 실험을 통해 검증한 결과 누설 인덕턴스의 최소화가 필요함을 확인하였다.

이 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KETIP) 연구비 지원에 의한 연구임(20010855)

참고 문헌

[1] M. Escudero, D. Meneses, N. Rodriguez and D. P. Morales, "Modulation Scheme for the Bidirectional Operation of the Phase-Shift Full-Bridge Power Converter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 4, pp. 1377-1391, 2020.

[2] Zhu, Lizhi, Kunrong Wang, Fred C. Lee and Jih-Sheng Lai. "New start-up schemes for isolated full-bridge boost converters." in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 2, pp. 946-951, 2003.