

# 하이브리드 자동차 고전압 배터리 충, 방전을 위한 49kW급 고효율 양방향 DC/DC 컨버터 설계

양진영\*, 윤창우\*, 박성식\*, 최세원\*, 박래관\*\*, 장서건\*\*  
\*서울산업대학교, \*\*에이디티

## Design of a 49kW high efficiency bidirectional DC-DC converter for charge and discharge of high voltage battery in HEV

Jinyoung Yang\*, ChangWoo Yoon\*, SungSik Park\*, Sewan Choi\*, RaeKwan Park\*\*  
Seogeon Chang\*\*

\*Seoul National University of Technology, \*\*ADT

### ABSTRACT

In this paper a high efficiency bi-directional DC-DC converter for hybrid vehicles is proposed. The proposed converter a three-phase half-bridge interleaved ZVS converter, is designed to have high efficiency in the main operation range. The component ratings are calculated, the actual devices are selected, and the efficiency analysis has been performed to determine optimal ZVS range. The input and output current ripples are significantly reduced due to the interleaved operation. The dual loop control for the interleaved three-phase converter is also presented. To confirm the proposed converter, The simulation and experimental results are presented.

### 1. 서론

최근 전 세계적으로 환경오염 및 석유 에너지 고갈에 대한 대책으로 하이브리드 전기자동차(HEV)에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다. 하이브리드 전기 자동차의 동력원은 크게 내연 엔진과 모터 그리고 배터리로 구성된다. 자동차의 기동 시엔 배터리에서 에너지를 모터로 전달하며, 감속 또는 정지 시에는 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 회생시켜 주 배터리를 충전하게 된다<sup>[1]</sup>.

그림 1은 하이브리드 자동차의 구동시스템을 나타낸다. 전력 변환장치(Power Conversion System)의 입력 측엔 고전압 대용량의 배터리와 출력 측엔 모터가 존재하며, 전력 전달 매개체로서 모터를 구동하기 위한 인버터와 배터리의 전압을 높은 전압으로 승압시키기 위한 DC/DC 컨버터가 위치한다. 이중 DC/DC 컨버터는 양방향의 전력흐름이 가능해야 하는데, 모터

구동시 배터리가 방전하여 모터로 전력을 전달하는 부스트 동작과 모터의 회생 에너지로 배터리를 충전하는 벡 동작을 만족해야 하며, 부스트 와 벡 동작 모두 그림 1에서 인버터 앞단의 커패시터 전압인 직류 링크전압을 제어하여 양방향 동작을 수행하게 된다<sup>[2]</sup>.

이때 배터리의 전압과 직류 링크전압의 차이가 크지 않고 절연이 필요치 않으므로 양방향 DC/DC 컨버터는 주로 비절연형(Non-isolated type)이 사용된다. 또한 비절연형 양방향 DC/DC 컨버터에 적용할 수 있는 토폴로지로서 Half-bridge, Cuk, 및 Sepic 등의 여러 가지가 있는데 이중 스위치 전압·전류정격과 인덕턴스가 가장 작고 소자의 수가 적은 Half-bridge 방식의 양방향컨버터가 가장 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 고 전력 밀도를 갖는 49kW급 양방향 DC/DC 컨버터를 제안한다. 상수의 증가에 따른 소자 정격 및 효율을 비교하였으며, 제안된 컨버터의 주 동작 부하영역(25~35kW)에서 최대의 효율을 갖기 위한 주요소자의 설계기법을 제시하였다. 또한 제안된 컨버터의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 1kW급의 축소모델을 제작하여 실험결과를 제시하였다.

### 2. 제안하는 양방향 컨버터

#### 2.1 구성 및 동작원리

본 연구에서는 배터리전압이 240~280V의 범위에서 동작하고 직류링크 전압이 450~600V로 제어되어 입·출력 전압 차가 작기 때문에 비절연형의 Half-bridge 컨버터 토폴로지를 채택하였다. 이러한 Half-bridge 컨버터의 동작은 연속 도통모드(Continuous Conduction Mode)와 불연속 도통 모드(Discontinuous Conduction Mode)가 있는데 본 방식에는 인덕턴스가 작아 동적특성이 우수하고 별도의 회로 없이 영전압 스위칭(Zero Voltage Switching)이 가능하여 스위칭 손실을 줄일 수 있으며 역방향 회복시간의 영향에 의한 전류서지 문제가 없는 DCM 동작의 스위칭 방식을 적용한다<sup>[3]</sup>. 그러나 이러한 DCM 방식은 인덕터 전류에 음의 전류 구간을 만들기 위하여 전류의 피크치가 커져 이로 인한 소자의 전류정격이 커지고 도통손실이 증가하며 입·출력 필터의 부피가 증가하는 단점이 있다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여 인터리빙 방식의 다상 컨버터를 적용할 수 있는데 본 연구에서는 제시한 사양을 만족하

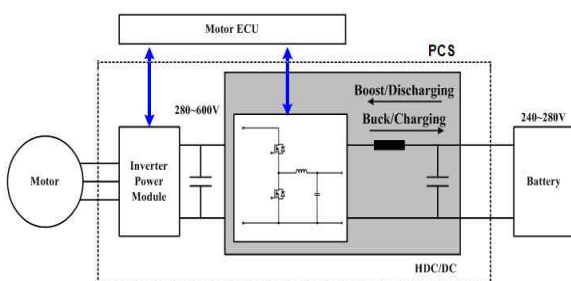


그림 1 HEV 구동 시스템 구성도

표 1 상수에 증가에 따른 양방향 컨버터 소자 정격

	1상	2상	3상
인덕턴스 @70% ZVS 범위	24.3uH	48.7uH (x2P)	72.9uH (x3P)
스위칭 RMS 전류	183 A	91 A	61 A
입력 커패시터 리플 전류	395 A	99 A	33 A
출력 커패시터 리플 전류	395 A	201 A	132 A
최대 효율	90.7%	93%	94.1%

는 DCM 방식의 양방향컨버터를 단상, 2상 및 3상의 컨버터에 대해 각각의 주요 소자를 설계한 후 표 1에 정격을 나타낸다.

표 1에서 보듯이 상수의 증가에 비례하여 소자의 수가 증가하고 인덕턴스가 증가하는 단점이 있으나 각 스위칭 전류정격의 감소로 스위치의 선정(SkiM 350)이 용이하게 되고 입력과 출력의 리플전류가 매우 작아지므로 커패시턴스가 작아진다. 또한 전류 리플이 작아져 커패시터의 ESR에 의한 손실도 매우 작아진다<sup>[4]</sup>. 이러한 상수 증가에 의한 소자정격 및 효율을 비교·분석 후 본 논문에서는 3상 컨버터를 선정하였다.

그림 2에서 보듯이 제안하는 3상 양방향 컨버터는 3개의 인덕터가 병렬로 배터리 측에 위치하며 6개의 IGBT 스위칭과 입·출력의 커패시터로 구성되어 있다. 부스트 동작시 상측의 IGBT 스위칭 S2, S4, S6이 주 스위칭으로 동작하며 벡 동작시에는 하측의 스위칭 S1, S3, S5가 주 스위칭으로 동작한다.

S1과 S2, S3과 S4 및 S5와 S6로 구성된 3상의 각 레그는 서로 상보적(Complimentary) 스위칭을 하며 인터리빙으로 인한 입·출력 전류 리플의 감소를 위해 각 상은 서로 120° 위상차를 가지고 동작을 한다. 또한 3개의 인덕터는 DCM 으로 동작하여 ZVS 스위칭을 가능하게 하여 턴 온 손실을 제거한다.

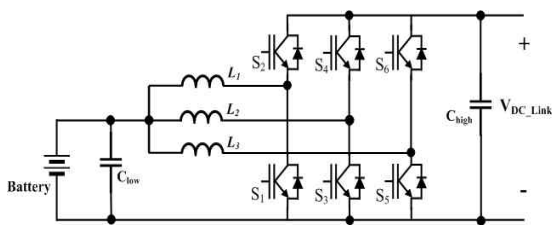


그림 2 3상 양방향 컨버터

## 2.2 최적의 효율 곡선을 위한 설계기법

선정된 3상 양방향 컨버터가 주 동작부하(25~35kW) 범위에서 가장 높은 효율을 갖는 것을 설계목표로 하여 각 소자를 설계한다.

3상 양방향 컨버터에서 인덕터 전류가 경계조건(Boundary Condition)에서 동작하도록 하는 인덕턴스  $L_B$ 는 다음과 같다.

$$L_B = 3 \times V_{in} \times \frac{D(1-D)}{2I_{out} \times f_s} \quad (1)$$

이때 스위칭주파수  $f_s$ 는 15kHz 이며 입·출력의 전압차가 가장 작을 때를 고려하여야 하므로 (입력 측 배터리 전압 : 240V,

출력 측 직류링크 전압 : 450 V) 식 (1)을 이용하여 경계 조건인 인덕턴스에 따른 ZVS의 가능범위를 그림 3에 나타낸다.

그림 3에서 보듯이 인덕턴스를 작게 하면 ZVS 범위는 점점 넓어져 스위칭 손실은 작아지지만 인덕터 전류의 리플이 증가하여 이로 인한 스위칭 등의 소자 정격과 도통 손실이 증가한다. 따라서 최적의 효율을 갖는 ZVS 범위를 적절히 선정하여 스위칭 손실과 도통 손실을 Trade-off 하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 우선 ZVS 범위를 각각 60%, 70%, 80%, 90% 으로 선정하여 인덕터를 설계하였다. 또한 스위칭 소자의 도통손실과 스위칭손실, 인덕터의 동손과 철손 및 커패시터의 ESR에 의한 손실 등을 고려 하여 효율을 계산, 그림 4에 나타내었다.

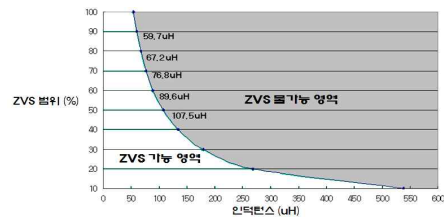
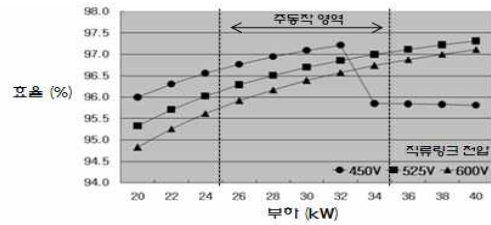
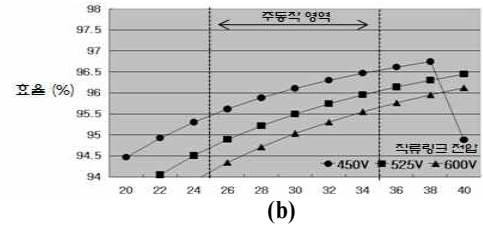


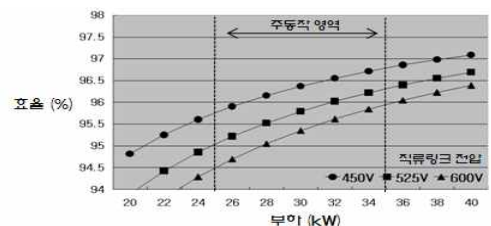
그림 3 인덕턴스에 따른 ZVS의 가능범위



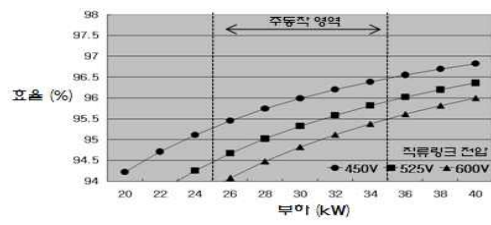
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4 ZVS범위에 따른 주 부하영역에서의 효율 (a) 60% , (b) 70% , (c) 80%, (c) 90%

이때, 배터리 전압은 260V이고, 스위칭 주파수는 15kHz로 선정하였다. 또한 직류링크전압이 가변제어 될 수 있으므로 450V, 525V, 600V의 세 경우를 고려하였다. 그림 4(a)의 경우는 직류 링크전압이 450V일 때 주동작 영역에서의 최고 효율이 가장 높지만 부하가 증가하여 약 32kW 이상에서는 ZVS가 이루어지지 않으므로 효율이 낮아진다. 그림 4(b)~(d)의 경우를 보면 그림 4(b)의 ZVS 범위를 70%로 한 경우가 주동작 영역에서 전체적인 효율이 가장 좋으므로 본 논문에서는 70%의 ZVS 범위를 갖도록 설계하는 것이 최적이라는 결론을 얻었다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험

본 논문의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 1kW급 축소 모델의 실험을 실시하였다.

스위칭주파수는 15kHz이며, 70%의 ZVS 범위를 갖도록 인덕턴스는 각각 75 $\mu$ 로 설계 하였다.

그림 5는 제안한 컨버터의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

그림 5(a)는 각각의 인덕터 전류와 입력전류 파형을 보여준다. 각 인덕터 전류는 120°의 위상차를 가지고 있어 입력전류가 인터리빙이 되어 각 인덕터 전류보다 리플이 작고, 3배의 주파수 성분을 가지는 것을 확인 할 수 있다.

그림 5(b)는 그림 2의 회로에서 S<sub>2</sub>의 게이트 신호가 off 되면 스위치 S<sub>1</sub>의 전압이 0으로 된 후에 스위치 S<sub>1</sub>의 전류가 채널로 도통하는 S<sub>1</sub> 스위치의 ZVS 동작을 확인하였다.

그림 6은 제안한 컨버터를 1kW급의 축소 모델로 제작하여 그림 2의 S<sub>2</sub> 스위치의 ZVS 동작에 대해서 관찰한 결과를 나타내었다. 그림 5(b)의 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 S<sub>2</sub>의 스위치 전압이 0으로 된 후에 S<sub>2</sub>의 게이트 신호가 on 되어 스위치 S<sub>2</sub>의 채널로 도통되는 ZVS 동작을 잘 보여주고 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 하이브리드 자동차용 양방향 DC/DC 컨버터를 제안하였고 주 동작영역에서 높은 효율을 갖는 것을 설계목표로 하는 설계기법을 제안하였다. 제안된 설계기법을 적용하여 소자 설계를 수행하였고 실제 소자를 바탕으로 효율을 분석하여 최적의 효율그래프를 갖는 ZVS 동작 범위를 선정하였다.

시뮬레이션 및 1kW 급의 축소 모델의 실험을 통하여 제안한 3상 양방향 DC/DC 컨버터의 타당성을 검증하였다. 제안된 컨버터의 특징은 다음과 같다.

- ZVS를 통한 스위칭 손실을 저감
- 인덕턴스가 작아 부피 감소 및 동적 특성 우수
- 인터리빙으로 인한 입·출력 전류 리플 저감

향후 49kW 급의 시제품 제작과 실험을 통하여 전체 회로의 효율 측정 및 분석을 수행할 예정이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 자동차부품 연구원 주관으로 수행된 과제임

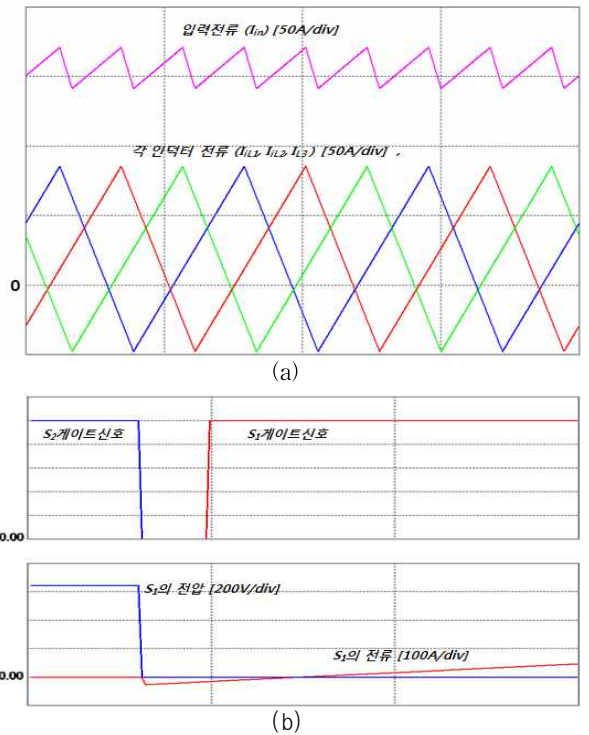


그림 5 시뮬레이션 파형  
(a) 인덕터 전류와 입력전류 (b) ZVS 동작

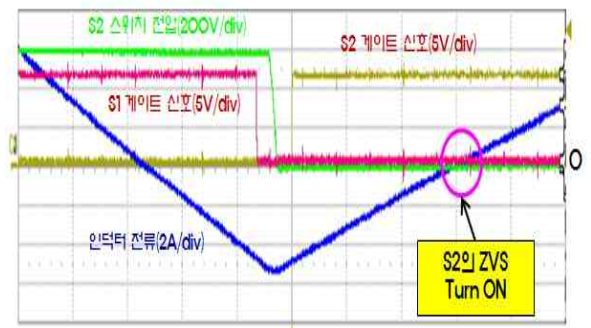


그림 6 ZVS 동작 실험 파형

### 참고 문헌

- [1] 조진상, 최세완, 송홍석, “하이브리드 전기자동차(HEV)의 12V 보조배터리 충전용 DC-DC 컨버터의 최적설계”, 2004 전력전자학술대회 논문집 (I), 2004. 7, pp. 325~329
- [2] J. H. Park, B. H. Cho, “A frequency control led Bi-directional synchronous rectifier converter for HEV using super-capacitor”, IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 2004, pp. 135-140,
- [3] G. Hua and F. C. Lee, “Soft-switching techniques in PWM converters,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 42, pp. 595 - 603, Dec. 1995.
- [4] R.Y. Kim, J. S. Lai, “High-power density design of a soft-switching high-power bidirectional dc-dc converter”, IEEE Trans. on PE, vol 4, July 2007, pp.1 - 7