

# 연료전지 차량용 커플드 인덕터를 적용한 인터리브드 벡-부스트 컨버터

오성택, 박준우, 최봉연, 황선민, 문형태  
HL만도

## Coupled Inductor based Interleaved Buck-Boost Converter for FCEV

Seong-Taek Oh, Jun-Woo Park, Bong-Yeon Choi, Sun-Min Hwang, Hyung-Tae Moon  
HL Mando

### ABSTRACT

본 논문은 BHDC와 LDC가 결합된 IDC에서 BHDC의 주요 소자 설계 기법을 설명한다. 고전력밀도 및 가격경쟁력 강화를 위하여 입력커패시터, 인덕터를 IDC용으로 신규 설계하였으며, 인덕터의 경우 2상 인터리브드 구동을 위해 2개의 인덕터를 DM(Differential Mode)으로 적용하였다. 본 설계를 토대로 샘플을 제작하여 전기적 성능을 검증하였다.

### 1. 서론

IDC(Integrated DC-DC Converter)는 연료전지 차량에서 연료전지의 출력을 저전압으로 변환하는 LDC(Low voltage DC-DC Converter)와 연료전지 출력부와 고전압 배터리간의 전력변환을 위한 BHDC(Bidirectional High voltage DC-DC Converter)가 결합된 통합형 제품을 말한다. 연료전지는 동특성이 떨어지기 때문에 부하 변동에 의한 영향을 크게 받으므로, 별도의 고전압 배터리가 요구된다. 따라서, BHDC는 연료전지의 출력을 보조하는 전력변환장치로 연료전지의 출력이 부하보다 작은 경우 연료전지 측으로 전력을 보내 출력을 보조한다. 반대로, 연료전지의 출력이 부하 요구보다 커지게 되거나 회생 제동에 의해 발생하는 잉여 전력을 배터리에 충전하는 양방향 특성이 있다<sup>[1]</sup>.

일반적인 BHDC의 구조인 IGBT 모듈을 활용한 3상 구동 방식은 원가 측면에서는 우수하나, 스위칭 주파수의 증가가 제한되어 사이즈 축소 측면에서 불리하다<sup>[2]</sup>. 따라서, 수동 소자(인덕터, 커패시터 등)의 사이즈 축소를 위하여 차동 모드(Differential Mode) 커플드 인덕터 연구가 활발히 진행되고 있다. 여기서, 2상 인터리브드 구조는 커패시터에 충전되는 전류가 한 주기에 2번 발생되어 RMS전류가 낮아지고, 인덕터 코어 내부 자속 상쇄를 통한 자화 전류 오프셋 저감으로 코어 부피를 대폭 감소시킬 수 있다. 이를 개선한 블록 형태의 파우더 코어를 활용한 방식은 중족(Center-leg)이 없어 대전력용으로 용이하다<sup>[3]</sup>. 본 논문에서는 입·출력 커패시터를 분리 설계한 방법과 제어 특성을 고려한 인덕터 설계 기법을 실제 제품을 통해 검증한다.

### 2. 제안하는 회로

본 논문에서 적용한 DC/DC 컨버터의 구조는 그림1과 같다. 고전압배터리부 전압은 200V대역이며, 연료전지부 전압은

250V에서 450V의 범위를 갖는다. 해당 토폴로지는 커플드 인덕터를 적용한 인터리브드 벡-부스트 컨버터이므로, 양방향 전력 변환이 가능하다. 커패시터는 IDC 시스템 상 LDC의 배치도 고려해야되므로 고전압배터리부(입력)와 연료전지부(출력)를 분리 설계하였으며, 각 상의 전류와 입·출력 전압을 센싱하여 전류 제어기는 스위칭 주파수와 동일하게 설정하며, 전압 제어기는 전류 제어기에 의한 영향을 줄이기 위하여 스위칭 주파수보다 낮은 주파수로 동작을 수행한다.

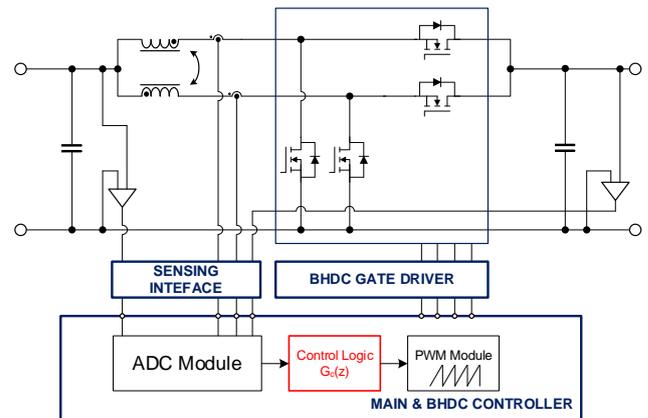


그림1 BHDC 시스템블록도  
Fig.1 System block diagram of BHDC

### 3. 소자 설계

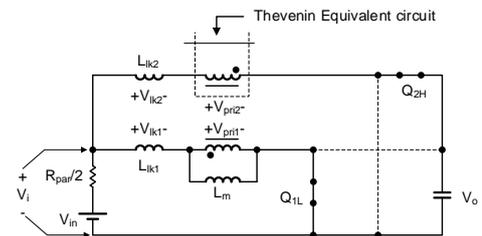


그림2 상별 전류 기울기 계산을 위한 부분 동작 모드  
Fig.2 Leakage inductor generation mechanism in the inductor case

커플드 인덕터의 특성상 1:1의 권선이 요구되며, 대전류 사양에 요구되는 와이어 선경을 고려하여 창면적 공간 확보가 유리한 블록 형태의 파우더 코어를 선정하였다. 부하 변동에도 제어 가능한 조건의 인덕턴스 확보를 위하여 충분한 턴 수

증가가 요구된다. 또한, 일반 부스트 컨버터와 달리, 누설 인덕터도 전류 기울기를 결정하므로 최대 전류 기울기를 검증해야 한다. 그림2의 동작 모드 기준으로 식 (1)과 식 (2)를 도출할 수 있다. 최대  $41A_{pk\_pk}$  기준에서  $f_c$ (Cutoff frequency)등을 선정하고, 커패시터는 일반적으로 인가 전압 조건, 전압 리플 사양을 통한 커패시턴스와 커패시터에 전달되는 RMS전류량을 참고하여 소자를 선정한다. RMS전류량 정보는 식(1)과 식(2)를 합한 입력 커패시터의 전류 리플값으로 구할 수 있으며, 출력 커패시터는 부스트 컨버터의 전압이득식을 추가로 고려하여 예측한다. IDC에서는 상기 조건 외에 입력 측에 고전압배터리가 연결되어 있으므로, 낮은 고조파가 요구된다<sup>[4]</sup>. 따라서, 커패시터 용량은 스위칭 주파수보다 낮은 주파수를 고려한 식(3)을 활용하여 선정한다. 또한, 출력 커패시터는 인버터용 DC 링크 커패시터와 하네스 등의 기생 인덕턴스를 고려하여 설계했다.

$$\Delta i_{Lk1} = (1 - D - \frac{L_m}{2L_m + L_{lk}}) \frac{V_o}{L_{lk}} DT_s \quad (1)$$

$$\Delta i_{Lk2} = (\frac{L_m}{2L_m + L_{lk}} - D) \frac{V_o}{L_{lk}} (1 - D) T_s \quad (2)$$

$$C_f = \frac{1}{(2\pi \times 0.1f_{sw})^2 \times L_f} \quad (3)$$

#### 4. 실험 결과

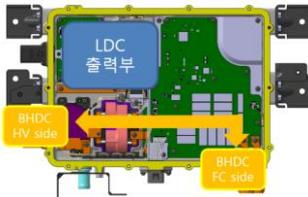


그림3 실제 제품에서 BHDC의 구성  
Fig.3 BHDC configuration in real sample

본 논문에서 검증에 활용한 시료의 제품 컨셉 디자인은 그림3과 같으며 상단부는 LDC 출력부, 하단부에는 BDHC가 배치되어 있다. 주요 부품값 정보는 표1과 같다.

표 1 설계 사양

Table 1 Design Specification

입력 전압	200~275 [V]
출력 전압	250~450 [V]
출력 전력	15 [kW]
스위칭 주파수	30 [kHz]
커플드 인덕터 인덕턴스	85 [ $\mu$ H]
Function	Bi-Directional

본 논문에서 적용한 DC-DC 컨버터의 타당성 검증을 위해 정상 상태 시험 파형과 효율을 측정하였다. 파형은 한 상의 High Side, Low Side Vds 파형과 각 상의 인덕터 전류를 측정하는 것이다. 그림4(a)는 입력 전압 200V, 출력 전압 400V 조건의 정상 상태 파형이며, 그림4(b)는 입력 전압 275V, 출력 전압 450V 조건의 정상 상태 파형이다. 두 파형을 통해, 정상 상태에서 동작 이상 없음을 검증하였다. 그림5에서는 입력 전압 275V에서 출력 전압 350V, 450V 시의 효율을 측정한 결과를 나타낸다. 그 결과, 평균 효율 97% 이상, 최대 효율 98.7%를 달성하며 기본 동작 성능을 검증하였다.

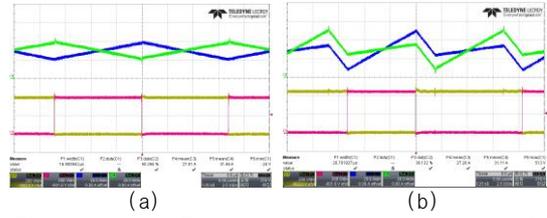


그림4 상 별 인덕터 전류 및 High Side와 Low Side MOSFET Vds 파형  
Fig.4 Inductor current by phase and high side and low side MOSFET Vds waveforms

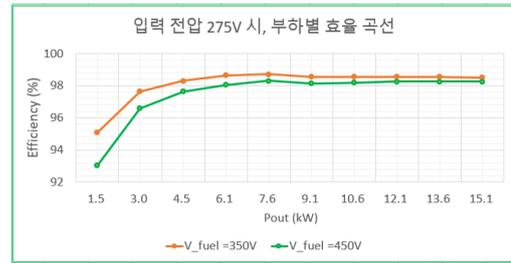


그림5 전압 및 부하별 효율 곡선  
Fig.5 Efficiency curve by voltage and load

#### 5. 결론

본 논문에서는 커플드 인덕터를 활용한 2상 인터리브드 벽-부스트 컨버터 설계에 대한 연구 결과를 실험을 통해 검증하였다. 제안하는 회로는 코어 부피 감소 장점을 이용하여 사이즈 측면에서 유리함을 가진다. 또한, 평균 효율 97% 이상, 최대 효율 98.7%를 달성하며 향후 높은 경쟁력을 가질 것으로 예상된다.

#### 참고 문헌

- [1] C. C. Chan, "The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 95, No. 4, pp. 704-718, 2007, April
- [2] 이지명, 이재용, 박래관, 장서건, 최경수, "하이브리드 전기 자동차 구동용 전력변환장치", *전력전자학회논문지*, 13권, 6호, 420-429페이지, 2008, 12월
- [3] 양정우, 금문화, 최윤, 한상규, 김석준, 김삼균, 김종필, 사공석진, "하이브리드 자동차 HDC를 위한 50kW급 고전력밀도 양방향 컨버터", *전력전자학회논문지*, 21권, 2호, 95-101페이지, 2016, 4월
- [4] K. Uddin, A. Moore, A. Barai, J. Marco, "The effects of high frequency current ripple on electric vehicle battery performance", *Applied Energy*, Vol. 178, pp. 142-154, 2016, Sep.