

하이브리드 자동차용 HDC를 위한 50kW급 고전력밀도 양방향 컨버터

양정우, 금문환, 최윤, 김석준*, 김삼균*, 김종필*, 한상규†
 국민대학교 POESLA, (주)현대자동차*

High Power Density 50kW Bi-directional Converter for Hybrid Electric Vehicle HDC

Jung Woo Yang, Moon Hwan Keum, Yoon Choi, Seok Joon Kim*, Sam Gyun Kim*,
 Jong Pil Kim*, Sang Kyoo Han†

Power Electronics System Laboratory, Kookmin Univ, HYUNDAI MOTORS Co Ltd*

ABSTRACT

본 논문은 하이브리드 자동차 HDC(High voltage DC DC Converter)를 위한 고전력밀도 양방향 컨버터를 제안한다. 기존 HDC는 낮은 동작주파수로 인하여 인덕터 전류 리플 만족을 위해 큰 인덕터 용량이 요구될 뿐만 아니라 대전류 구동시 인덕터의 자기포화를 방지하기 위해 코어의 크기가 커지는 단점이 있다. 본 논문에서 제안하는 양방향 컨버터는 고속 스위칭 특성이 우수한 SiC FET의 적용을 통해 인덕터의 용량을 통해 입력력 커패시터의 고밀도화를 획득할 수 있으며, 각 상의 인덕터를 하나의 DM(Differential Mode) 커플드 인덕터로 구현함으로써 인덕터 자화전류 offset를 제거할 수 있으므로 인덕터의 고밀도화에 매우 유리하다. 제안된 HDC 양방향 컨버터의 타당성 검증을 위하여 50kW급 시제품 제작을 통한 실험 결과를 제시한다.

1. 서론

최근 하이브리드 자동차에서 연비 향상 또는 EV(Electric Vehicle)모드의 가속성능 등의 목적을 위해 모터의 출력이 증대됨에 따라^[1] 양방향 HDC에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 IGBT를 이용한 양방향 HDC는 Tail Current 의해 고속 동작에 한계가 존재하므로, 낮은 동작주파수에서 인덕터 전류 리플 만족을 위해 큰 인덕터가 요구되어 고전력밀도화가 어렵다.^[2] 따라서 본 논문에서는 SiC FET 적용을 통해 고속 스위칭을 달성하고, 2상 인터리브드 구동을 통해 커패시터의 용량 및 체적을 저감한다. 또한, 2상 인터리브드 구동을 위해 요구되는 2개의 인덕터를 DM 커플드 인덕터로 적용하여 인덕터의 용량 및 체적저감을 통해 고전력밀도화가 가능하다.

2. 제안된 양방향 부스트 컨버터

그림 1은 하이브리드 자동차의 전원변환 장치인 양방향 HDC의 구성을 보인다. HDC는 고압 배터리의 전압을 입력전원으로 하여 인버터 직류전압 링크단에 요구되는 전압으로 승압하여 전기모터의 효율을 높이는 DM 커플드 인덕터를 적용한 2상 인터리브드 양방향 컨버터로 구성된다. 기존 컨버터에 사용되는 IGBT의 경우 Tail current에 의해 고주파 구동이 어려운 반면, 제안 회로의 경우 내압, 정격전류 및 스위칭 특성이 우수한 SiC FET를 적용을 통해 리액티브 소자의 부피 저감이 가능하다.

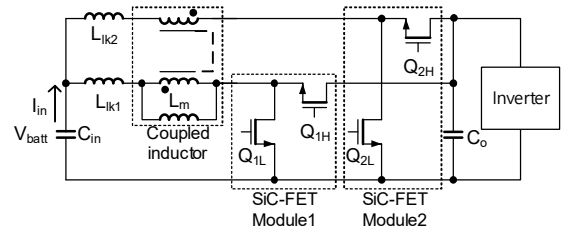


그림 1 제안된 인터리브드 방식 양방향 부스트 컨버터
 Fig. 1 A proposed interleaved bi-directional boost converter

2.1 제안 양방향 컨버터의 구동 원리

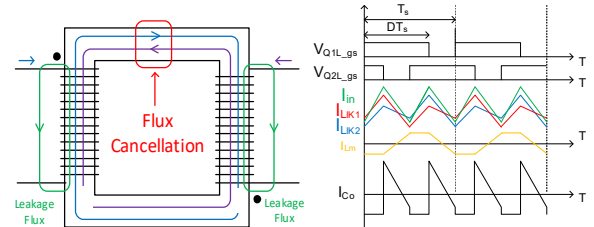


그림 2 2상 인터리브드 동작
 Fig. 2 2-Phase interleaved operation

그림 1과 같이 2개의 단상 컨버터를 병렬로 연결한 후 각 상에 180°의 위상차를 주어 동작시키는 2상 인터리브드 방식을 사용하면, 실제 스위칭 주파수의 증가 없이 스위칭 주파수를 2배 높이는 효과를 얻을 수 있다. 따라서 기존 Non Interleaved 방식의 HDC는 1주기에 1Cycle동안 출력 커패시터의 큰 충방전이 이루어진 반면, 그림 2와 같이 Interleaved 방식의 HDC는 1주기에 2Cycle동안 출력 커패시터 충방전이 나누어져 이루어지므로 출력 전압 리플 만족을 위한 커패시턴스 용량 저감이 가능하다. 또한, 2상 인터리브드 구동시 전체 출력전력을 각 상이 절반씩 부담하므로 동일한 출력 전력을 가지는 단상 컨버터 구동에 비하여 상당 평균전류가 절반이 되므로 소자의 전류스트레스 및 도통손실 저감에 유리하다. 또한 인터리브드 구동 방식은 2개의 단상 컨버터를 병렬로 연결하므로 컨버터 구동에 사용되는 인덕터도 2개가 필요하다. 본 논문에서는 두 개의 인덕터를 커플링 함으로써 하나의 커플드 인덕터를 사용한다. 이와 같은 커플드 인덕터 적용 방법으로 크게 CM(Common Mode)방식과 DM 방식으로 나눌

수 있다. CM방식의 경우, 인덕터의 각 상에 흐르는 전류에 의해 내부 자속이 증가하여 인덕턴스 확보에 유리한 장점이 있으나, 자화 인덕턴스에 의한 전류가 증첩이 되어 자화전류 offset이 크므로 대전력에서 자기포화 발생의 가능성이 높다. 반면, DM방식의 경우, 그림 2와 같이 각 상의 인덕터에 흐르는 전류에 의해 내부 자속이 서로 상쇄된다. 따라서, 출력전력 증가에도 자화전류 offset이 이론적으로 0이 되어 자기포화 레벨이 현저히 낮아 자기포화 발생 우려가 없으므로 인덕터에 사용되는 코어 사이즈의 저감 또한 가능하다.

2.2 제안 양방향 컨버터의 손실 분석을 통한 주요소자값 선정

2.2.1 스위칭 주파수 선정

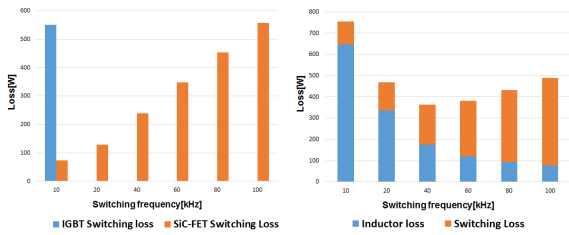


그림 3 스위칭 주파수 증가에 따른 손실 비교
Fig. 3 Comparison of total loss in accordance with increase of switching frequency

그림 3은 동일한 인덕터 전류 리플을 가지는 경우, 스위칭 주파수에 따른 IGBT적용 컨버터의 스위칭 손실과 SiC FET적용 컨버터의 스위칭 손실을 나타내었으며, SiC FET적용 컨버터의 동일한 코어 및 인덕턴스 조건하에서 스위칭 주파수에 따른 인덕터에 의한 손실 및 스위칭 손실을 나타낸다. 스위치 종류에 따른 스위칭 손실 비교결과 SiC FET가 고속 스위칭에 적합하다. SiC FET를 적용한 제안 양방향 컨버터는 스위칭 주파수가 낮을수록 전류 리플 증가에 의한 인덕터 손실이 전체 손실의 큰 비중을 차지하며, 스위칭 주파수가 높을수록 스위치의 턴 온/오프 손실이 주파수에 비례하여 증가하므로 스위칭 손실이 전체 손실의 큰 비중을 차지한다. 이를 통해 전체 손실이 적은 구간의 스위칭 주파수를 선정한다.

2.2.2 누설 인덕턴스 선정

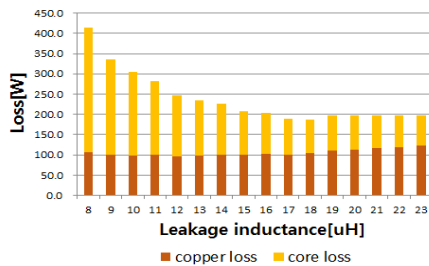


그림 4 누설인덕턴스 증가에 따른 인덕터 손실 비교
Fig. 4 Comparison of inductor loss according to increment of leakage inductance

그림 4는 선정된 스위칭 주파수에서 누설 인덕턴스 증가에 따른 코어에서 발생하는 손실과, 코일에서 발생하는 손실을 나타낸다. 누설 인덕턴스 증가에 따라 누설 인덕턴스를 확보하기 위한 권선 수 증가로 인해 자화 인덕턴스가 증가하므로 코어손실은 감소하는 반면, 권선저항의 증가로 코일손실은 증가한다. 따라서 누설 인덕턴스 증가에 따라 전체 인덕터 손실의 큰 변

화가 존재하지 않는 구간에서 코어손실과 코일 손실이 평형을 이루는 누설 인덕턴스 값을 선정한다.

3. 실험 결과

제안된 양방향 컨버터의 타당성을 검증하기 위해 아래와 같은 사양으로 제작하였다.

- $P_o = 50kW$ • $V_{in} = 220V-400V$ • $V_{out} = 700V$ • $V_{nominal} = 320V$
- $f_s = 60kHz$ • $L_{lk}/L_m = 15uH/42uH$ • $C_{in}/C_o = 50uF/70uF$

그림 5는 정격입력전압인 320V 조건 하에 최대 출력 50kW에서 측정된 주요 실험파형과 효율을 제시하고 있다. 본 논문에서는 입력 전압 조건 중 가장 상용화 되어 있는 320V 전압 조건의 실험 파형만을 제시한다. 고주파 구동 및 인터리브드 동작으로 인덕터의 체적은 0.313[l], 입/출력 커패시터의 체적은 0.336[l]로서 매우 낮은 수준임을 확인하였다. 또한, 최대출력 50kW에서 각 상의 인덕터 전류는 38A의 리플을 가지며, 이때 효율은 97.97%의 높은 효율을 가진다. 기존 IGBT를 적용한 양방향 컨버터의 경우, 동일한 인덕터 전류 리플을 가지기위해 현 수준의 약 10배 이상의 인덕턴스(453uH)가 요구되므로 제안 양방향 컨버터를 통해 고전력밀도를 실현 하였다.

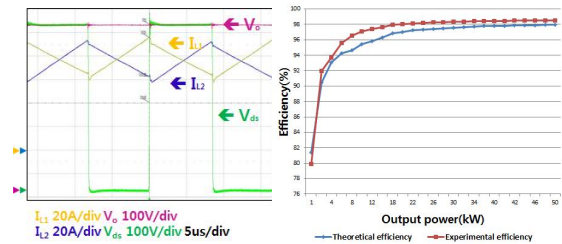


그림 5 주요 실험 파형 및 이론효율과 실험효율 결과 비교
Fig. 5 Experimental key waveforms and comparison theoretical efficiency to experimental efficiency

4. 결론

본 논문에서 제안된 320Vdc 입력전압, 50kW 출력의 하이브리드 HDC가 97.97%의 높은 효율을 가짐을 증명하였으며, 사용된 리액티브 소자(인덕터 및 커패시터)의 전체 부피가 0.649[l] 수준으로 매우 작으므로 고전력밀도화에 적합함을 확인하였다. 본 논문에서는 제시되지 않았지만, 300V ~400V에서 최대 부하 효율 97.5 ~98.1%의 효율을 달성하였다.

이 논문은 (주) 현대자동차(HYUNDAI MOTORS)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] 권태식, 이현동, “그린카 구동용 인버터 기술 동향”, 전력전 자학회지 제 14권 제 4호, pp. 28 32, 2009.8
- [2] 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, pp. 1 7, 2007, July