

하이브리드 자동차 HDC를 위한 고승압 소프트스위칭 양방향 컨버터

오세철, 정병길, 김성환, 박준성, 최세완
서울과학기술대학교

High Gain Soft switching Bi-directional converter for Hybrid Electric Vehicle HDC

Secheol Oh, Byoungkil Jung, Sunghwan Kim, Junsung Park, Sewan Choi
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 $D=0.5$ 에서 2배의 승·강압비를 갖는 하이브리드 자동차 HDC용 비절연 양방향 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 CCM에서도 소프트스위칭이 가능하며 스위치 전압정격이 1/2로 되어 소자의 선정에 유리하다. 또한 수동소자의 부피도 기존 양방향 컨버터 보다 작아 고효율 및 고전력 밀도를 달성할 수 있다. 제안하는 양방향 컨버터의 최적의 스위칭 기법을 제안하였고 10kW급 축소시작품의 실험을 통해 본 논문의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

하이브리드자동차에서 양방향 DC-DC 컨버터는 직류 링크 전압을 제어함과 동시에 배터리를 방전시켜 모터로 전력을 전달하는 부스트 동작과 모터의 회생 에너지를 배터리로 충전하는 벅 동작을 수행한다. 최근 배터리의 가격과 셀전압 불균형 문제로 배터리 전압은 점차 낮아지고(<200V) 인버터 및 모터의 효율을 높이기 위해 DC 링크 전압(>650V)은 점차 높아지는 추세여서^[1] 높은 승·강압비를 갖는 비절연컨버터가 요구된다. 그러나 현재 사용되는 양방향 하프브리지 벅-부스트 컨버터는^[2] 높은 승·강압을 얻기 위해 큰 듀티를 필요하게 되고 스위치의 전류 스트레스가 증가하여 실제 사용할 수 있는 승·강압비가 제한된다.

본 논문에서는 동일한 듀티로 기존 양방향 컨버터의 승·강압비의 약 2배가 되고 CCM에서도 소프트 스위칭이 가능한 양방향 컨버터를 제안한다^[3]. 제안한 토폴로지는 스위치의 개수는 2배가 되나 전압정격이 1/2로 되어 600V정격의 IGBT나 MOSFET의 사용을 가능하게 하는 장점을 갖는다. 이같이 낮은 전압정격의 소자를 사용하고 소프트스위칭이 가능하므로 스위칭주파수를 더욱 올려 고전력밀도를 달성할 수 있다. 승·강압시 도통손실과 스위칭손실을 저감하기 위한 최적의 스위칭방법을 제시하고 10kW급의 축소시작품을 통하여 타당성을 검증하였다.

2. 제안하는 컨버터의 동작원리

그림 1에 제안하는 양방향 DC-DC 컨버터를 나타내며 그림 2에 승압 동작시 주요 파형을 보여준다. 그림 2에서 보듯이 고전압측 스위치 S_3 은 S_1 보다 D_{d3} 만큼 늦게 ON하고 S_4 는 S_2 보다 D_{d4} 만큼 늦게 ON하고 동시에 OFF한다.

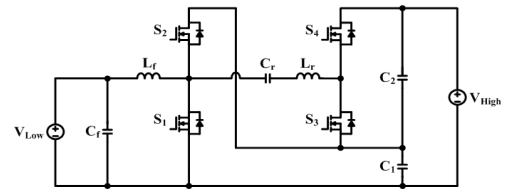


그림 1 제안하는 고승압 소프트스위칭 양방향 DC-DC 컨버터

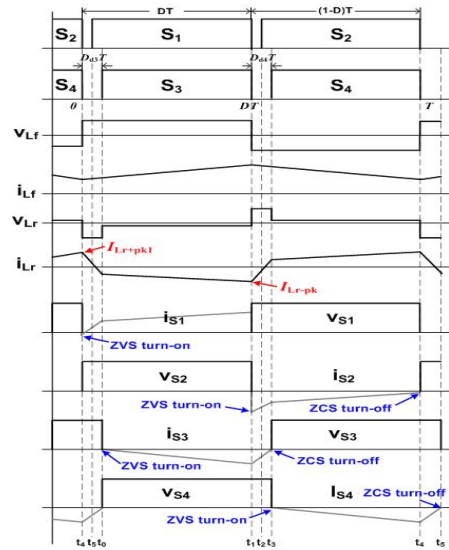


그림 2 제안하는 컨버터의 승압 동작시 주요 파형

승압 동작시 D_{d3} 과 D_{d4} 에 따라 스위치의 실효전류 및 ZVS 영역이 변하므로 최적의 D_{d3} 와 D_{d4} 는 다음과 같다.

$$D_{d3} = \frac{2 \cdot I_o \cdot L_r}{V_{Lr}(V_a - V_{th}) \cdot (1 - D - \text{Dead Time}) \cdot T_s} \quad (1)$$

$$D_{d4} = \frac{2 \cdot I_o \cdot L_r}{V_{Lr}(V_a) \cdot (D - \text{Dead Time}) \cdot T_s} \quad (2)$$

그림 3에는 강압 동작시 주요 파형을 보여준다. 그림 3에서 보듯이 저전압측 스위치 S_2 는 스위치 S_4 보다 D_{d2} 만큼 늦게 ON 하고 동시에 OFF한다. 강압 동작시 D_{d2} 에 따라 스위치의 실효전류 및 ZVS 영역이 변하므로 최적의 D_{d2} 를 구하는 것이 중요하며 최적의 D_{d2} 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$D_{d2} = \left(\frac{I_r(I_{0(\min)} - I_{Lr+pk2} - I_{Lr-pk})}{V_{Lr(D_1)T}} \right) + \frac{2C_{oss(\max)}V}{I_{Lr+pk2}} \quad (3)$$

여기서

$$I_{Lr+pk2} = \sqrt{\frac{2C_{oss(\max)}V_{Lr(D_2)}^2}{L_r}} = I_{Lr+pk1} - I_{0(\min)}$$

$$I_{Lr-pk} = \frac{V_{Lr(1-D-D_2)} \cdot (1-D-D_2)T}{L_r}$$

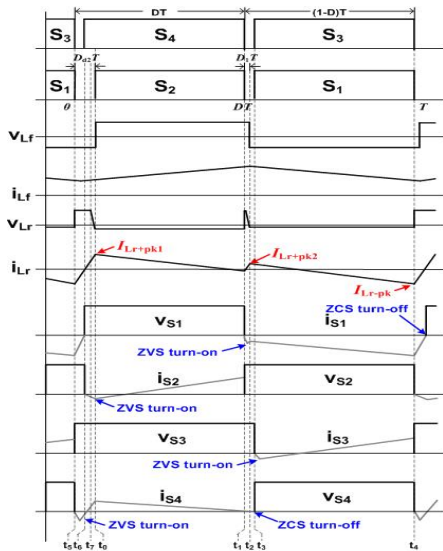
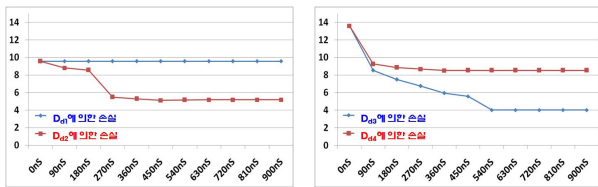


그림 3 제안하는 컨버터의 강압 동작시 주요 파형

그림 4는 지연듀티에 따른 도통손실 및 스위칭 손실을 나타낸 그래프이다. 최적 지연듀티는 $D_{d1}=0nS$, $D_{d2}=450nS$, $D_{d3}=540nS$, $D_{d4}=360nS$ 가된다.



(a) 강압시 D_{d1}, D_{d2} 에 따른 손실 (b) 승압시 D_{d3}, D_{d4} 에 따른 손실

그림 4 지연듀티에 따른 손실

3. 실험 결과

제한한 컨버터의 타당성을 입증하기 위해 그림 1을 2상으로 인터리빙한 양방향 컨버터를 다음의 사양으로 제작하였다.

- ▶ $P_{out} = 10kW$ ▶ $V_{in} = 72V$ ▶ $V_{out} = 400V$ ▶ Duty = 0.64
- ▶ $f_s = 30kHz$ ▶ $\Delta I_{in} = 5\%$ ▶ $\Delta V_{out} = 5\%$

표1 설계소자

소자 종류	사용 소자
스위치	IXFN100N50P
필터 커패시터	80uF
보조 커패시터	30uF
필터 인덕터	100uH
보조 인덕터	4uH

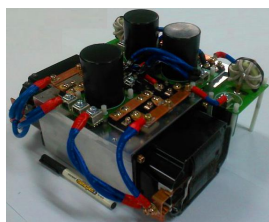


그림 5 10kW 시작품

이때 사용된 소자의 정격을 표1에 표시하였다. 그림 6와 7에서 승·강압 동작시 모든 스위치가 ZVS 턴온하는 것을 확인하였다. 승압시 최고효율 97.1%와 강압시 최고효율 97.8%가 각각 측정되었다.

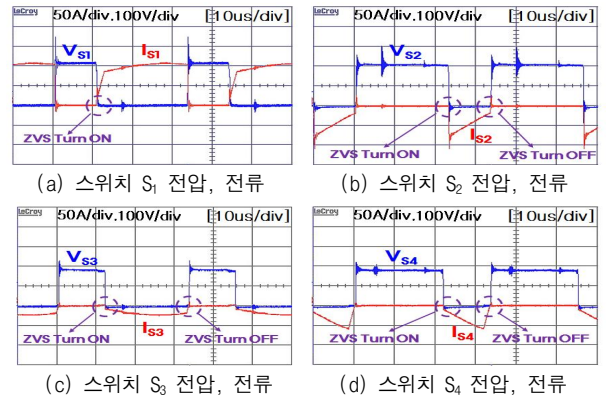


그림 6 승압 동작시 실험 파형

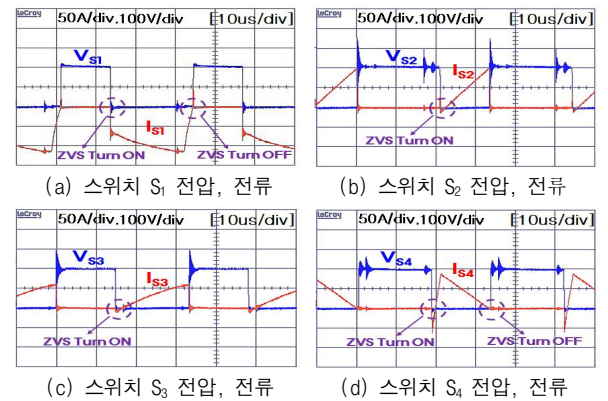


그림 7 강압 동작시 실험 파형

4. 결론

본 논문에서는 기존에 비해 2배의 승·강압비를 가지며 CCM에서도 소프트 스위칭이 가능한 비절연 양방향 DC-DC 컨버터에 대한 최적의 스위칭 기법을 제안하고 실험을 통하여 검증하였다. 최적의 스위칭 타임으로 스위치의 스위칭손실과 도통손실을 최소화하여 승압시 최고효율 97.1% 강압시 최고효율 97.8%를 달성하였다.

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2011-0018025)

참고 문헌

- [1] 권태석, 이현동, “그린카 구동용 인버터 기술 동향”, *전력전자학회지* 제4권 제4호, pp. 28-32. 2009. 8
- [2] Junhong Zhang, J.S. Lai, “High-Power Density Design of a Soft-Switching High-Power Bidirectional dc-dc Converter”, *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 4, pp.1-7, July 2007.
- [3] S Park, S Choi, “Soft-switched CCM Boost Converters with High Voltage Gain for High Power Applications”, *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 25, no. 5, pp. 1211 - 1217, May 2010.