

# 전기버스용 HDC를 위한 12kW급 전력변환장치

이용철, 정은진, 강찬호, 한경석\*  
 (주)이지트로닉스, 현대자동차(주)\*

## 12kW Power Conversion Unit for Electric Bus HDC

Yong Chul Lee, Eun Jin Jung, Chan Ho Kang, Gyung Seok Han\*  
 EGTRONICS Co., Ltd., HYUNDAI MOTORS\*

### ABSTRACT

본 논문은 전기버스에 사용되는 HDC(High voltage DC DC Converter)를 위한 제어 전략에 대하여 설명한다. 기존 IGBT를 사용한 HDC는 낮은 동작 주파수로 인하여 전류 리플 만족을 위해 인덕터 용량이 증대되며, 대 전류 구동 시 자기 포화 방지를 위해 코어의 크기가 커지는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 고속 스위칭 특성이 우수한 SiC FET의 적용을 통해 인덕터 용량을 저감하였다. 또한 일반 산업에서 많이 사용되고 있는 Phase Shift PWM 방식의 아날로그 IC를 사용하여 비절연 강압형 DC DC 컨버터의 동작 및 성능을 구현시킬 수 있는 방법에 대하여 설명한다. 본 논문에서는 제안된 방식의 타당성을 검증하기 위하여 이론적 분석 및 시작품을 제작하여 실험을 수행하였으며, 본 연구의 제어 전략과 제품의 성능은 실차 시험을 통하여 그 타당성을 검증하였고 보완설계를 통하여 신뢰성을 확보하였다.

### 1. 서 론

세계적으로 고유가와 자동차 관련 환경규제에 대한 강화 추세로 화석연료를 대체하는 전기자동차, 하이브리드 자동차 및 연료전지 자동차 등 친환경 자동차에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전기 차의 연비 향상 또는 EV(Electric Vehicle) 모드의 가속성능 목적을 위해 모터의 출력은 증대되는 추세이다. 일본의 도요타 프리우스의 개발 동향을 보면 표 1과 같이 배터리의 전압은 낮아지고, 인버터 및 모터 출력 증대를 위하여 직류링크 전압은 높아지는 추세이다.<sup>[1]</sup> 이와 같은 낮은 전압을 가지는 배터리와 고전압 모터를 구동하기 위하여 배터리와 모터 구동용 인버터 사이에 고전압 직류 변환 장치(High voltage DC DC Converter : HDC)단이 존재한다. HDC는 절연이 필요하지 않으므로 구조가 간단하고 소자의 수가 적은 하프브리지 비 절연 DC/DC 컨버터가 주로 사용되어 왔다. 기존 IGBT를 이용한 HDC는 IGBT의 턴 오프 특성 및 병렬 연결된 다이오드의 역 회복 특성에 의해 고속 스위칭 동작에 한계가 존재한다. 이런 한계점으로 인해 인덕터 전류 리플 만족을 위한 큰 인덕터가 요구되며, 높은 출력 RMS 전류로 용량이 큰 출력 커패시터가 요구되므로 전력밀도를 높이는데 한계를 지닌다. 이러한 리액티브 소자의 용량과 체적을 줄이기 위한 방안은 주파수를 상승시키는 방법이 있다. 주파수를 상승시키기 위해 큰 내압을 가지며, 스위칭 특성 및 고온 동작 특성이 우수한 SiC

표 1 도요타 프리우스 배터리 사양

Feature	Prius Model					
	1997	2000	2004	2010	2015	
Battery	Modules	40	38	28	28	28
	Nominal Voltage[V]	288	273	201	201	201
	Nominal Capacity[Ah]	6.0	6.5	6.5	6.5	6.5
	Specific Power[W/kg]	800	1000	1300	1310	1400
	Module Weight[g]	1090	1050	1045	1040	1040
Electric Motor	Operating Voltage[V]	288	273	500	650	650

FET를 HDC에 이용한다.<sup>[2] [3]</sup> 또한 본 논문에서는 일반적으로 PSFB(Phase Shift Full Bridge) 컨버터를 위해 많이 사용되고 있는 Phase Shift PWM Controller IC를 사용하여 비절연 강압형 DC DC 컨버터의 동작 및 성능을 구현하였으며, 12kW급 시작품으로 제안한 방식의 타당성을 검증한다.

### 2. 제안 방식의 DC-DC 컨버터

제안하는 컨버터는 그림 1에서 나타나듯이 SiC FET(Silicon Carbide Field Effect Transistor)를 적용한 고속 스위칭 구동 방식과 Phase Shift PWM Controller IC를 사용하여 비절연 강압형 DC DC 컨버터를 구현한다.

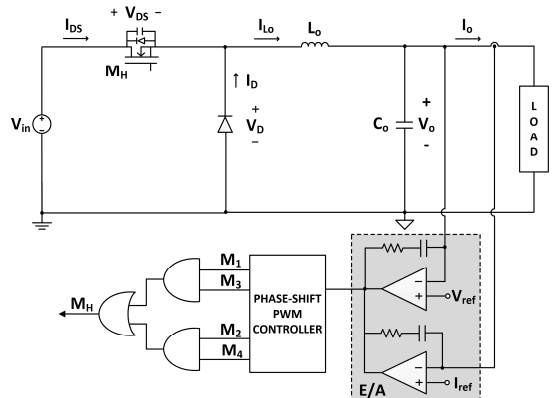
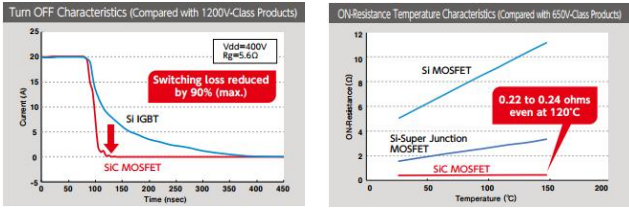


그림 1 Phase Shift PWM IC 제어를 사용한 HDC 블록도

#### 2.1 SiC-FET 적용

제안 컨버터는 차세대 전력 반도체 소자인 SiC FET를 적용하였다. SiC FET는 높은 전류밀도와 고 내압을 가지고 있으며, 그림 2(a)와 같이 우수한 턴 오프 특성으로 고주파 구동에



(a) 턴-오프 특성 (b) 도통저항 온도 특성  
 그림 2 SiC-MOSFET와 Si-IGBT 사이의 특성 비교

용이하며, 그림 2(b)와 같이 뛰어난 온도특성으로 인해 고온에서도 낮은 도통 저항을 유지한다. 따라서 고 내압 고온 동작이 필요한 자동차 분야에 적용이 용이하며, 고속 스위칭으로 인한 수동 소자 체적 저감을 통해 부피 저감에 유리하다.

### 2.2 Phase-Shift PWM 제어 방식 적용

그림 3은 아날로그 IC를 사용한 Phase Shift PWM 방식의 HDC 컨버터 동작과형이다. Phase Shift PWM Controller IC의 게이트 신호  $M_1$ 과  $M_2$ ,  $M_3$ 와  $M_4$ 는 고정된 주파수에서 50%의 시 비율을 가지고 상보적으로 동작하며, 위상을 천이하여 부하로 전달되는 에너지를 조절하는 방식이다. 비절연 강압형 DC DC 컨버터를 제어하기 위해 입력단의 에너지가 부하로 전달되는 구간의 게이트 신호  $M_1$ 과  $M_3$ ,  $M_2$ 와  $M_4$ 는 각각 AND 논리 게이트의 입력으로 인가되며, 각 AND 게이트의 출력이 OR 게이트의 입력으로 인가되어 스위치  $M_H$ 의 게이트를 생성한다. 따라서 한 주기 안에 입력 단의 에너지를 부하로 전달하는 과정이 두 번 있기 때문에 HDC의 동작 주파수는 2배가 되며, 스위치  $M_H$ 의 시 비율에 의해 출력으로 전달되는 에너지의 양을 제어한다. 상기의 제어 방식은 기존 비절연 강압형 DC DC 컨버터의 제어 방식과 비교하여 동일한 동작 및 성능을 구현시킬 수 있으며, 일반적으로 산업에서 많이 사용되는 위상천이 제어 IC를 통해 강압형 DC DC 컨버터의 성능 구현이 가능함을 제한한다.

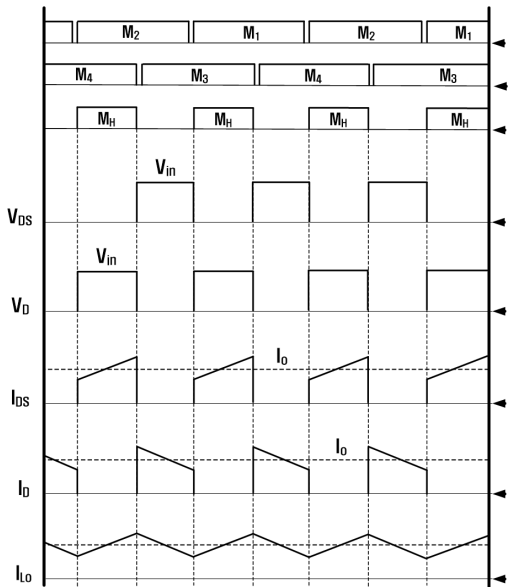


그림 3 Phase-Shift PWM 제어를 사용한 HDC 주요 파형

### 3. 주요소자 선정

#### 3.1 출력 인덕턴스 선정

인덕턴스 선정에 있어서 전류 리플은 스위칭 손실 및 자성 소자 손실 그리고 인덕터의 전력밀도와 관계가 깊으므로 인덕턴스 선정이 중요하다. 스위칭 손실과 자성소자 손실은 인덕턴스가 작을수록 전류 리플이 증가하므로 스위치의 턴 오프 손실 및 코어손실은 증가하지만 권선 수 감소로 인한 동선손실 및 고 전력밀도에는 유리한 장점이 있다. 반면, 인덕턴스가 증가할수록 리플 전류가 작아지게 되고 동선에 흐르는 RMS 전류가 작아지지만 누설 인덕턴스를 추가로 확보하기 위해서는 추가로 권선 수를 더 확보해야 하므로 권선저항의 증가로 인하여 동선 손실이 증가하게 된다. 또한 인덕턴스 확보를 위한 권선 수 증가는 고 전력 밀도 구성에 불리하게 작용한다. 따라서 인덕턴스의 설계는 손실을 고려한 최소의 인덕턴스를 선정하는 것이 중요하며, 고 전력밀도 구현을 위해 턴 수가 적을수록 인덕터의 체적 저감에 유리하므로 인덕터 손실과 전체 손실을 비교하여 최소의 인덕턴스로 최적의 손실 값을 가지는 지점을 선정하는 것이 중요하다. 제안 시스템은 300uH의 인덕턴스를 선정하였다.

#### 3.2 스위칭 주파수 선정

낮은 구동 주파수에서는 인덕터 자화전류 리플 증가에 따른 인덕터 손실이 전체 손실 중 큰 비중을 차지하며, 스위칭 주파수가 증가할수록 스위치의 턴 온/오프 손실이 증가하므로 스위칭 손실이 전체 손실에서 큰 비중을 차지하게 된다. 모든 입력 전압에 대해 스위칭 주파수 40kHz~60kHz 구간에서 전체 손실이 가장 적었으며, 이 중 인덕터 및 커패시터 고밀도화에 적합한 60kHz의 스위칭 주파수를 선정한다.

### 4. 실험결과

동작원리 및 특성을 확인하기 위해 12kW급 시작품을 제작하여 실험을 수행하였으며 실험사양은 표2와 같다. 실험의 부하 전류는 100% 정격 부하로 설정하여 실험하였다. 그림 4는 설계된 소자로 구성된 제안회로의 조감도를 보이고 있다. 그림 5는 입력전압에 따른 동작과형으로 인덕터 전류와 스위치 양단 전압을 나타낸다. 스위치 양단 전압은 828V/12kW 조건에서 가장 큰 130V의 공진전압이 측정되었다. 그림 6은 부하와 입력전압 변동에 따른 효율곡선을 나타낸다. 효율 측정을 위해 전력 분석기(YOKOGAWA WT1800)를 이용하여 측정하였다. 최대 부하 조건인 12kW에서 모든 입력전압에 대해 98% 이상의 효율이 측정되었으며, 입력 538V, 출력 11kW 조건에서 최대 98.7%의 고 효율이 측정되었다.

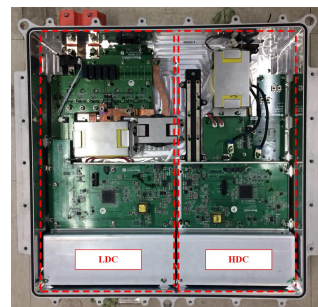
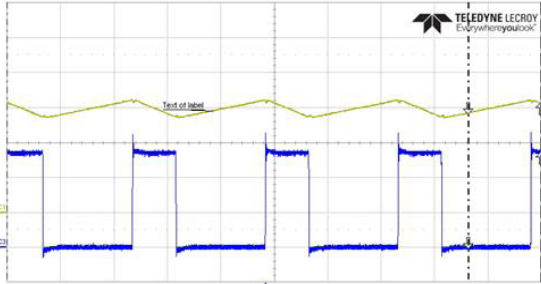


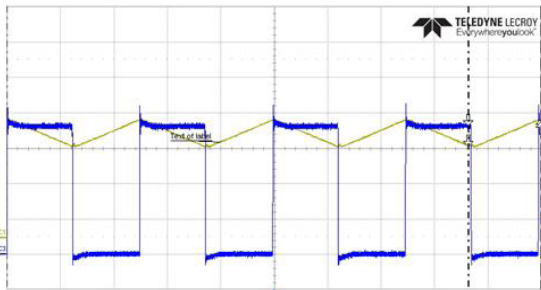
그림 4 HDC의 조감도

표 2 실험 사양

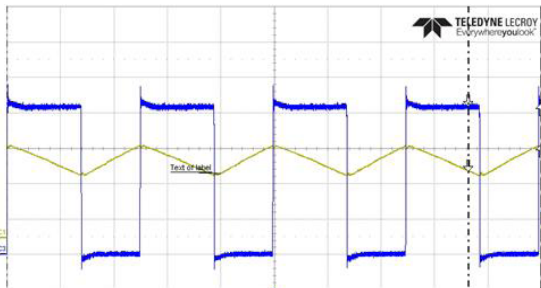
입력 전압( $V_{in}$ )	538~828V	출력 전압( $V_o$ )	360V
최대출력전력( $P_{o\ max}$ )	12kW	출력 인덕턴스( $L_o$ )	300uH
스위칭 주파수( $f_{sw}$ )	60kHz		



(a)  $V_{in} = 538V$

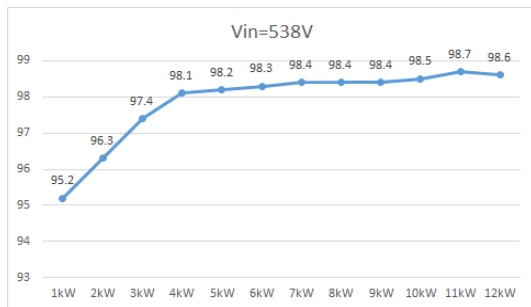


(b)  $V_{in} = 720V$

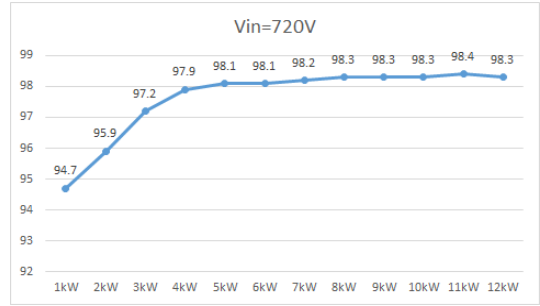


(c)  $V_{in} = 828V$

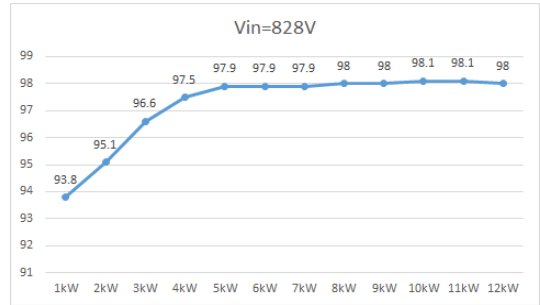
그림 5 HDC 실험 파형( $P_o=12kW$ ,  $V_o=360V$ ,  $f_{sw}=60kHz$ ,  $V_{ds}=200V/div$ ,  $I_{Lo} = 10A/div$ )



(a)  $V_{in} = 538V$



(b)  $V_{in} = 720V$



(c)  $V_{in} = 828V$

그림 6 HDC의 입력전압, 부하 별 효율 곡선

## 5. 결 론

본 논문에서는 Phase Shift PWM IC의 제어기법을 적용하여 대 전력 응용에 적합한 비 절연형 DC DC 컨버터를 제안한다. 기존의 IGBT를 사용한 컨버터는 낮은 구동 주파수로 수동 소자의 고밀도화에 적합하지 않다. 반면, 차세대 전력 반도체인 SiC FET를 적용하여 구동 주파수를 상승시켰으며, 일반 산업에서 많이 사용되고 있는 Phase Shift Controller IC를 사용하여 비절연 강압형 DC DC 컨버터의 성능을 구현하였다. 제안하는 컨버터의 타당성을 12kW급 시제품 제작을 통해 입증하였으며, 538V 입력전압에 대해 최대 98.7%의 고 효율을 달성하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] Se Cheol Oh, Jun Sung Park, Min Ho Kwon and Se Wan Choi, "High Gain Soft switching Bi directional Converter for Eco friendly Vehicle HDC", *Trans. Korean Inst. Power Electron*, Vol. 17, No. 4, pp. 322-329, August. 2012.
- [2] Jung Woo Yang, Moon Hwan Keum, Yoon Choi, Sang Kyoo Han, Seok Joon Kim, Sam Gyun Kim, Jong Pil Kim and Suk Chin Sakong, "High Power Density 50kW Bi directional Converter for Hybrid Electric Vehicle HDC", *Trans. Korean Inst. Power Electron*, Vol. 21, No. 2, pp. 95-101, April. 2016.
- [3] Ji Myoung Lee, Jae Yong Lee, Rae Kwan Park, Seo Geon Chang and Kyung Soo Choi, "Power Conversion Unit for Hybrid Electric Vehicles", *Trans. Korean Inst. Power Electron*, Vol. 13, No. 6, pp. 420-429, December. 2008.