

Full-bridge Converter의 새로운 ZVS 스위칭 기법

金昇龍^{*}, 宣漢杰^{**}, 韓萬勝^{***}, 朴晟濬[†]

Novel ZVS Switching Method of Full-bridge Converter

Seung-Ryong Kim, Han-Geol Sun, Man-Seung Han, and Sung-Jun Park

요 약

일반적인 DC/DC 전력변환기의 스위칭 방식은 하드 스위칭 방식과 공진을 이용한 소프트 스위칭 방식으로 분류할 수 있으며, 하드 스위칭 방식은 스위치의 턴 온/오프시 스위칭 소자에 생기는 전력손실이 커서 효율 면에서 불리하며, 공진형 소프트 스위칭 방식은 별도의 리액터와 커패시터를 추가함으로써 시스템의 사이즈와 비용이 증가하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 새로운 스위칭 방식의 소프트 스위칭 방식의 Full-bridge 전력변환기의 구조를 제안하였으며, 제안된 소프트 스위칭 방식은 앞단의 벅 컨버터의 다이오드 전류시 영전압이 되는 구간에서 Full-Bridge 컨버터의 스위치를 교번 함으로써 리액터와 커패시터의 추가없이 소프트 스위칭을 이루어냄으로써 시스템의 효율과 신뢰성을 향상시킨다. 또한 제안된 절연형 소프트 Full-bridge DC/DC 컨버터의 타당성을 검증하기 위해 Psim을 이용한 시뮬레이션과 500[W]급 DC/DC 컨버터를 제작하여 DC/DC 컨버터의 효율이 우수함을 확인하였다.

ABSTRACT

Existing switching system that is one of the ways which are used for DC/DC power converter is classified to hard-switching system and resonant-soft-switching system, generally. Hard-switching system is inefficient because the power loss of the switching element is large when it is been to trun on or turn off. And resonant-soft-switching system have the defect that need to add the another reactor and capacitor that make it expensive and huge. This paper suggest the ZVS Full-Bridge power converter contruction of novel switching system for the overcoming these shortcomings. In Suggested soft-switching system, the front of buck converter at diode current, switch is changing on and off at the part of full-bridge converter's zero voltage part. as the result that is possible to be ZVS excepting the reactor and capacitor. also to verify the reasonability of the isolated ZVS full-bridge DC/DC converter as previously suggested, we produced the 500[W] level DC/DC converter and enforced the simulation for Psim, and then it able to conform the superiority of the DC/DC converter's efficient.

Key Words : Power electronics, Full-bridge Converter, ZVS Soft-Switching

1. 서 론

최근 컨버터의 크기와 무게를 줄이고, 단위 체적당 전력 밀도를 높이기 위하여 스위칭 주파수를 높이려는 연구가 활발히 진행되고 있다^[1,2]. 스위칭 주파수가 높아지면 단위 체적당 전력 밀도는 높일 수 있으나 스위칭 손실이 증가 및 EMI(Electro Magnetic Interference) 잡음 또한 증가하기 때문에 전체 시스템의 효율에 큰 영향을 끼친다. 특히 하드 스위칭 방식의 PWM 컨버

[†]교신저자 : 정회원, 전남대 전기공학과 부교수
E-mail : sjpark1@chonnam.ac.kr

^{*}정회원, 고아정공 모터기술연구소 연구원

^{**}정회원, 고아정공 모터기술연구소 선임연구원

^{***}정회원, 고아정공 모터기술연구소 수석연구원

접수일자 : 2010. 10. 7 1차 심사 : 2010. 11. 1

심사완료 : 2011. 9. 9

터는 출력제어 성능은 우수하나, 높은 스위칭 스트레스와 스위칭 주파수에 비례한 스위칭 Losses가 증가하는 단점이 있다. 또한 이러한 스위칭 방식은 스위치 턴 온/오프시 큰 전류 기울기나 전압 기울기로 인하여 EMI 문제가 크게 나타난다^[3]. 따라서 전체 전력변환시스템의 효율을 향상시키기 위해서는 스위치의 손실을 줄여 효율을 향상시키는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 새로운 개념을 도입한 DC/DC 컨버터 전력변환기의 구조를 제안하였으며, Full-bridge 컨버터의 전압스트레스 저감을 위해 벅 컨버터의 다이오드 전류시 Full-bridge의 암(Arm) 전압이 0(zero)이 되는 구간에 Full-bridge 스위치 소자를 턴 온/오프 시킴으로써 ZVS 스위칭이 이루어지는 컨버터를 제안하였다. 이러한 스위칭 방식은 1차측 Full-bridge 컨버터와 직렬로 연결된 Buck 컨버터의 스위치를 사용하여 Full-bridge 암 양단의 전압이 0인 순간에 각 스위치의 상태 변화가 되도록 하는 새로운 개념의 소프트 방식으로서 Buck 컨버터의 리액터와 커패시터 제거를 통하여 시스템의 신뢰성과 전력손실을 저감시켜주는 전력변환 시스템이다. 또한 제안된 절연형 소프트 Full-bridge DC/DC 컨버터의 타당성을 검증하기 위해 Psim을 이용한 시뮬레이션과 500[W]급 DC-DC 컨버터를 제작하여 DC/DC 컨버터의 효율이 우수함을 확인하였다.

2. 새로운 절연형 DC/DC 컨버터의 구조

대부분의 컨버터가 출력 전압 제어를 위해 하드 스위칭 방식을 채용하고 있으나 스위칭 소자의 온/오프시 스위칭 손실로 인한 효율향상과 시스템 신뢰성에 한계가 있다. 이로 인해 최근 스위치 소자의 손실을 줄이기 위한 방법으로서 공진형 컨버터의 회로 기법을 이용한 ZCS 방식과 ZVS 방식을 많이 사용한다. ZCS 방식은 LC 직렬공진회로를 이용하여 전류가 Sine 파형으로 공진하게 됨으로서 스위치 소자의 전류가 0인 상태에서 턴 온/오프하게 된다. ZVS 방식은 LC 병렬공진회로를 사용하여 전압이 Sine 파형으로 공진하게 됨으로서 스위치 소자의 전압이 0인 상태에서 턴 온/오프하게 된다. ZCS와 ZVS 방식은 이와같은 방법으로 스위치 소자의 손실을 줄일 수 있다^[4]. 이러한 대부분 소프트 스위칭 방식 컨버터는 L-C resonant Tank 회로를 이용하여 Tank의 공진에 의한 전압, 전류가 Oscillating하여 부하에 공급되며, 스위치는 영 전압 또는 영 전류에서 상태를 조작한다. 이는 동작주파수가

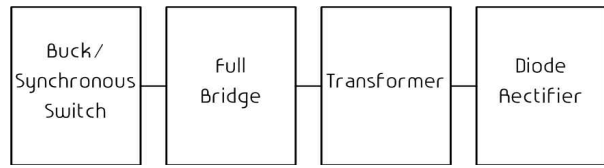


그림 1 제안된 시스템 블록다이어그램
Fig. 1 Proposed system block diagram

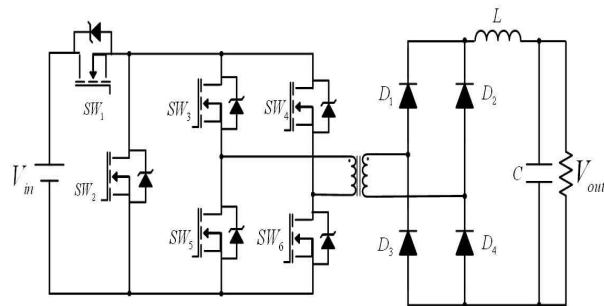


그림 2 제안된 ZVS 스위칭용 Full-Bridge 컨버터
Fig. 2 Proposed ZVS switching full-bridge converter

공진 주파수로부터 위 아래로 변할 수 있는 폭이 제한되어 있으며 낮은 선택도(Quality factor)값 때문에 넓은 범위의 출력 전압을 제어하기 위해서는 주파수의 변화가 커야만 하는 단점이 있다.

2.1 제안된 DC-DC 컨버터의 구조

그림 1은 제안된 컨버터의 블록다이어그램으로 Buck/SR 스위치와, Full-bridge부, 변압기부, DIODE 정류부로 연결되는 구조로 되어있으며, 기존의 Full-bridge 컨버터의 회로에 직렬로 Buck컨버터의 구조를 추가하여 Full-bridge 스위치가 ZVS 동작을 이룰 수 있도록 하였다. 기본적인 동작은 직렬로 연결된 Buck 스위치가 Off 되었을 때 Full-bridge 스위치가 턴 온/오프 하여 스위치 전압이 0인 상태에서 스위칭을 하게하는 구조이다.

그림 2는 본 논문에서 제안한 절연형 DC-DC컨버터의 기존구조를 나타내고 있으며, 변압기 1차측에 연결된 Full-bridge 컨버터는 전압제어를 하지 않고 단순히 절연을 위한 소프트 컨버터로 동작하며, Full-bridge 컨버터의 앞단에 연결된 Buck-type 컨버터에서 전압제어를 행하게 된다. 또한 Buck-type 컨버터 구조의 다이오드 동작영역인 SW₂는 Buck컨버터의 스위치에 해당하는 SW₁이 Off될시 Full-bridge의 암 전압이 0이되는 것을 보장하기 위해 동기형 컨버터 방

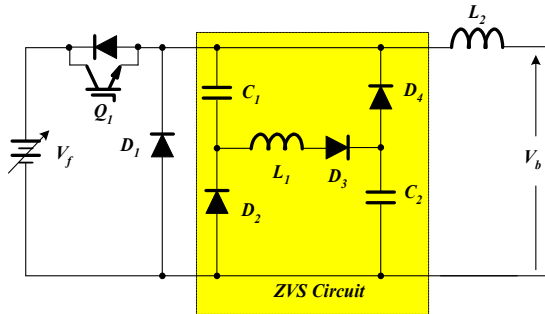


그림 3 ZVS 스위칭용 Buck 컨버터
Fig. 3 Buck converter for the ZVS

식을 적용하였으며, 이 스위치 소자를 MOSFET 소자를 사용함으로써 전류시 다이오드의 전압강하를 적게 할 수 있어 SW₂의 도통손실을 저감할 수 있는 구조로 구성하였다. 본 시스템에서 Buck-type 컨버터는 기존의 동기형 컨버터에서 L-C필터를 제거함으로써 SW₂가 On시 Full-bridge 컨버터의 암 전압이 zero가 됨으로써 이때 Full-bridge 컨버터의 스위치를 절체 한다면 소프트 스위칭이 가능한 구조이다. 본 시스템에서 Full-bridge 컨버터는 소프트 스위칭이 가능하나 Buck-type 컨버터는 하드스위칭으로 동작하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위한 Buck 컨버터의 소프트 스위칭에는 다양한 방법이 있으며, 그림 3은 본 학회에서 발표한 ZVS용 Buck컨버터의 토폴로지이다.

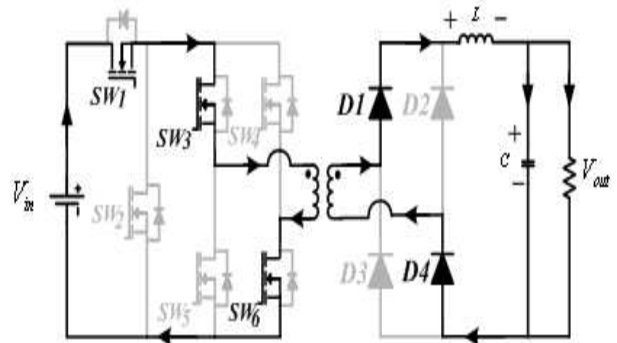
이러한 토폴로지를 적용한다면 DC-DC 컨버터 전체 스위치가 소프트 스위칭이 가능한 구조이다. 본 논문에서 제안하는 DC-DC 컨버터의 포인트는 Full-bridge 컨버터 앞단에 직렬로 Buck 컨버터를 연결하면 Full-bridge 컨버터에서는 부하에 관계없이 전 영역에서 소프트 스위칭이 가능함을 입증하는 것으로 Buck-type 컨버터는 하드 스위칭 방식으로 구성하였다.

2.2 제안된 컨버터의 동작 모드

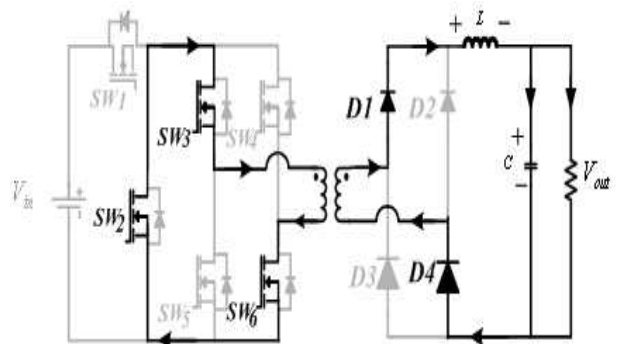
그림 4는 본 연구에서 제안된 DC-DC 컨버터를 나타내고 있으며, 컨버터의 동작모드는 4개의 동작 모드로 구분할 수 있다.

Mode 1

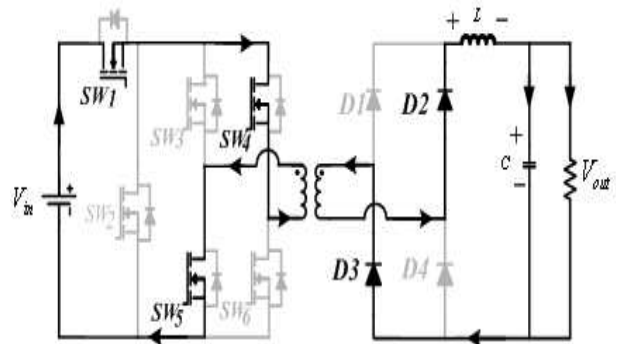
모드 1은 SW₃와 SW₆가 온 되고 SW₄와 SW₅가 오프되는 시점으로 입력전류는 SW₃와 SW₆를 통해 변압기를 거쳐 2차측에 전달된다. 그리고 다이오드



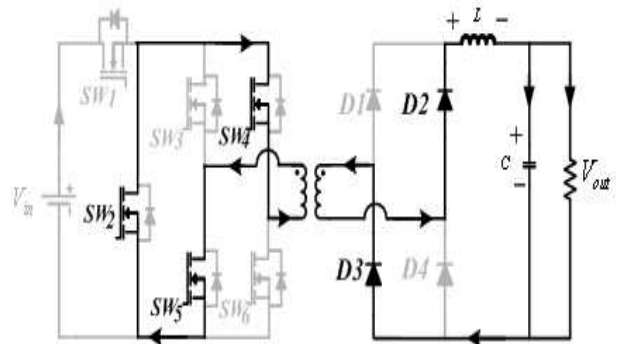
(a) mode 1



(b) mode 2



(c) mode3



(d) mode4

그림 4 제안된 DC/DC 컨버터 동작모드
Fig. 4 Proposed DC/DC Converter Operation Mode

D_1, D_4 를 도통시켜 입력측의 전력을 부하측으로 공급하게 된다.

2차 권선에 걸린 전압은 아래 식과 같다.

$$V_{se} = \frac{N_p}{N_s} \times V_s \quad (1)$$

그 때 출력 인덕터에 걸린 전압(V_L)은 아래 식과 같다.

$$v_L = \frac{N_s}{N_p} \times V_s - V_o \quad (2)$$

인덕터의 전류(i_L)는 아래식과 같이 직선적으로 증가한다.

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{v_L}{L} = \frac{L_1}{1} \left[\frac{N_s}{N_p} \times V_s - V_o \right] \quad (5)$$

Mode 2

모드 2는 이 모드 동안 SW_1 Buck 스위칭 소자는 오프되고, SW_2 가 온되어 다이오드의 전압강하보다 낮은 MOSFET의 R_{DS} 저항이 낮은 소자를 사용하여 손실을 저감시킨다. 반면에 D_1, D_4 는 모드 1의 자화 전류를 흐르게 하기 위해 도통된다.

Mode 3

모드 3은 SW_4 와 SW_5 가 On이 되고 SW_3 와 SW_6 는 오프되는 시점으로 입력전류는 SW_4 와 SW_5 를 통해 변압기를 거쳐 2차측에 전달된다. 그리고 다이오드 D_2, D_3 를 도통시켜 입력전원으로부터 L과 C가 충전이 되어 Mode1과 같이 입력측의 전력을 부하측으로 공급하게 된다. 이때 SW_1 은 SW_4 와 SW_5 의 ZVS동작을 위하여 턴 온 또는 오프된다. D_1, D_4 은 역바이어스되고 D_2, D_3 는 도통한다.

Mode4

모드 4는 Mode2와 마찬가지로 SW_1 Buck 스위치는 오프되고, SW_2 가 On되어 다이오드의 전압강하보다 낮은 MOSFET의 R_{DS} 저항이 낮은 소자를 사용하여 손실을 저감시킨다.

3. 시뮬레이션 및 시험 결과

3.1 시뮬레이션 결과

그림 5는 DC/DC 컨버터의 시스템 시뮬레이션 블록도를 나타낸다. 시뮬레이션은 Psim으로 행하였으며, 시뮬레이션 블록도에는 Buck/SR 스위치 부, 다이오드 정류방식을 적용한 Full-bridge 컨버터 부, DC-DC 컨버터의 스위칭 신호 발생을 위한 dll파일 부로 크게 3부분으로 나누어진다.

백 컨버터의 스위칭 주파수를 Full-bridge 컨버터의 스위칭 주파수에 비해 두 배의 주파수로 동작하게 하여 Full-bridge 컨버터의 소프트 스위칭을 구현 하였다.

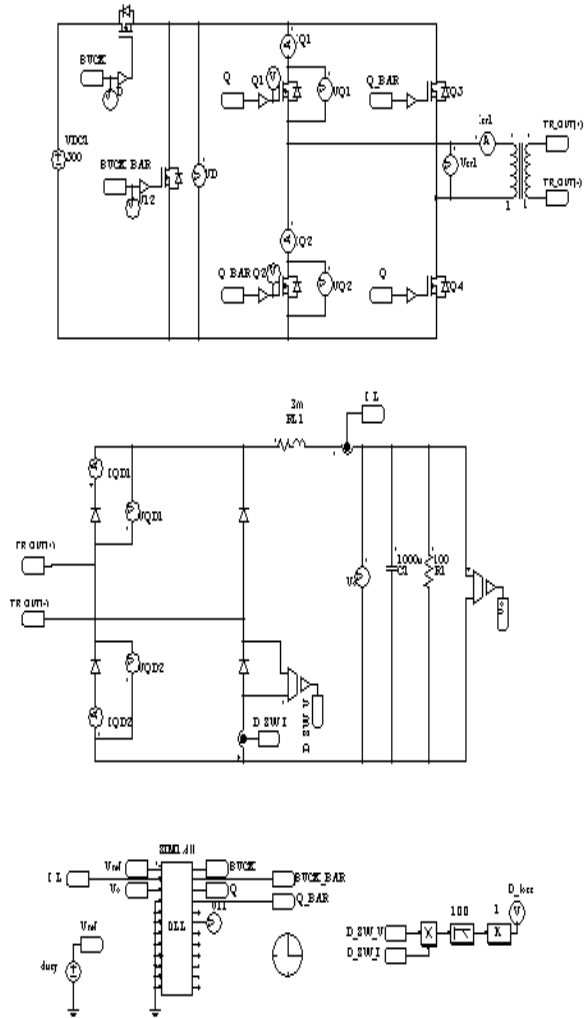


그림 5 시뮬레이션 회로도
Fig. 5 Simulation circuit

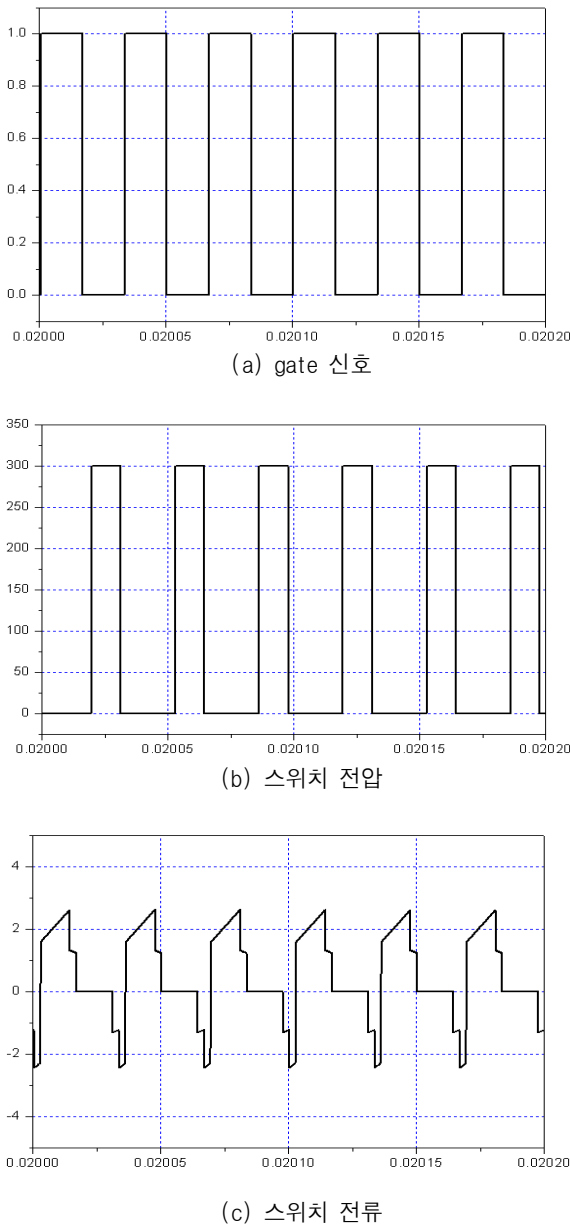


그림 6 Gate 신호, 스위치 전압, 스위치 전류
Fig. 6 Gate signal, switch voltage, current

그림 6은 Full-bridge 컨버터의 소프트 스위칭을 확인하기 위한 시뮬레이션 결과로 위 압의 Gate 신호, 스위치 전압, 스위치 전류를 나타내고 있다. 그림 6(b), (c)에서 알 수 있듯이 양호한 ZVS가 이루어짐을 알 수 있다.

그림 7은 Full-bridge 컨버터 출력인 변압기 1차측 전압, 전류 및 전류단 필터의 인덕터 전류를 나타내고 있다. 위 시뮬레이션은 Buck 컨버터의 시비율이 0.7인

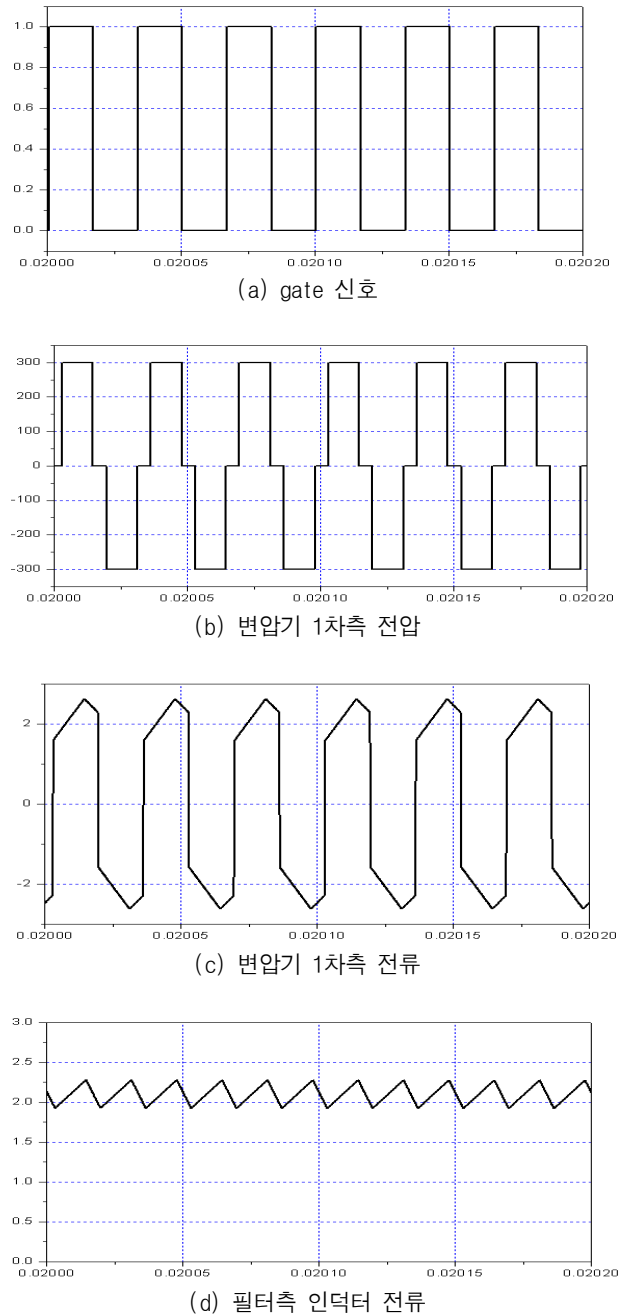


그림 7 Gate 신호, 변압기 1차측 전압, 전류, 필터 전류
Fig. 7 Gate signal, primary voltage & current, filter current

경우로 Full-bridge 컨버터의 출력전압도 변조비 0.7로 양호하게 나타나며 변압기 1차측 전류는 필터 인덕터 전류에 스위칭에 의한 정부 극성으로 양호하게 나타남을 알 수 있다.

3.2 실험 결과

본 연구에 사용된 DC-DC 전력변환기의 사양은 표 1과 같다.

표 1 실험 파라미터
Table 1 Experiment parameters

입력전압	DC 300V	출력전압	DC 210V
변압비	14:14	부하	100Ω
벽 스위칭 주파수	30kHz	풀브릿지 스위칭 주파수	15kHz

그림 8은 개발된 DC-DC 전력변환기를 나타내고 있다. 제어기는 AVR(ATMEGA2560)을 사용하였다.

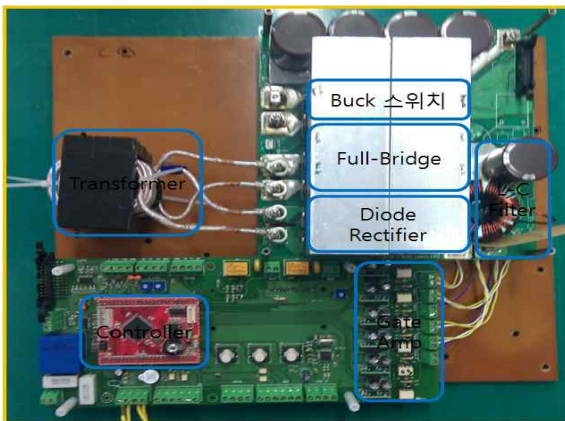


그림 8 제안된 DC/DC 컨버터 사진
Fig. 8 Photograph of Proposed DC/DC Converter

그림 9는 Full-bridge 컨버터의 소프트 스위칭을 확인하기 위한 Gate 신호, 스위치 전압, 스위치 전류를 나타내고 있다. Buck-type의 스위치와 Synchronous 스위치의 암단락을 방지하기 위하여 2[us]의 데드타임을 추가하였으며, Buck-type의 스위치가 Off가 되면 이로 인해 Full-bridge는 암전압이 0인 영역이 존재하며 이때 Full-bridge의 스위치 전환신호를 발생함으로 Full-bridge 컨버터는 Dead-time이 필요하지 않는 장점이 있다. 또한 시뮬레이션의 결과와 유사함을 알 수 있고 양호한 ZVS 가 이루어짐을 알 수 있다.

그림 10은 Full-bridge 컨버터출력인 변압기 1차측 전압, 전류를 나타내고 있다. Full-bridge 컨버터의 출력전압도 변조비 0.7로 양호하게 나타났으며, 그림 7의 시뮬레이션 결과와 유사함을 알 수 있다.

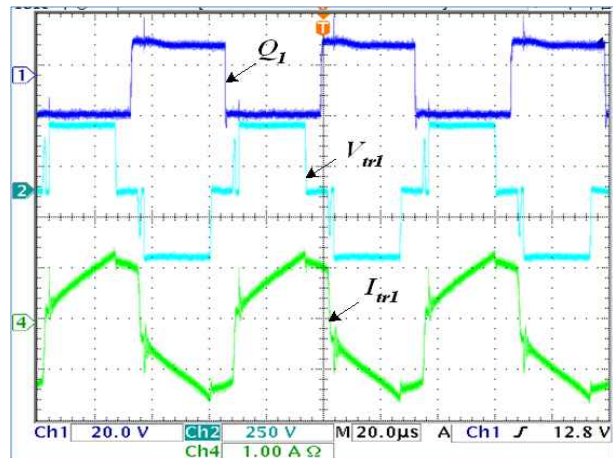


그림 10 Gate 신호, 변압기 1차측 전압, 전류 파형
Fig. 10 Gate signal, primary voltage & current waveform

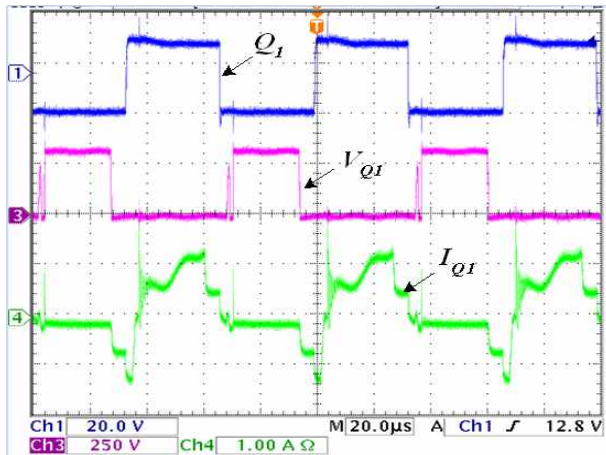


그림 9 Gate 신호, 스위치 전압, 스위치 전류 파형
Fig. 9 Gate signal, switch voltage, current waveform

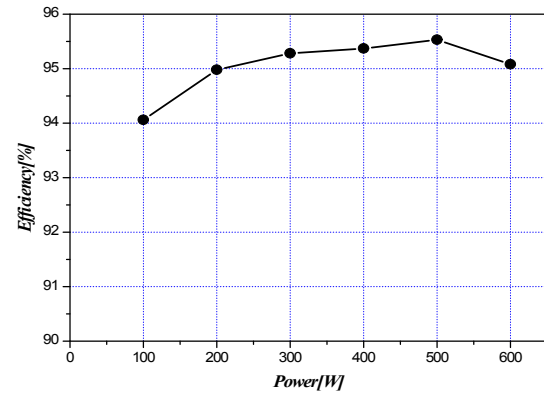


그림 11 출력에 따른 효율 특성 곡선
Fig. 11 characteristics of efficiency according to output power

그림 11는 출력전력에 대한 컨버터 시스템의 효율을 측정된 것으로 500[W]에서 최고 효율 95.53[%]로 측정되었으며, 효율이 매우 우수함을 확인하였다. 만일 Buck-type 부를 소프트 스위칭 방식으로 교체한다면 효율은 조금 더 상승할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 하드스위칭과 공진형 컨버터의 스위칭 기법의 단점을 보완하기 위해 소프트 스위칭 기법을 이용하여 새로운 절연형 DC-DC 컨버터 토폴로지를 제안하였다. 제안한 컨버터는 앞단의 Buck-type 컨버터를 이용한 Full-bridge 컨버터의 소프트 스위칭을 구현하였으며, 이로 인하여 Full-bridge는 압전압이 zero영역이 존재하며 이 때 Full-bridge 컨버터의 스위치 전환신호를 발생함으로 Full-bridge컨버터의 Dead-time이 필요하지 않는 장점이 있다.

제안된 방식에 대한 타당성 검증을 위해 Psim을 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과 Full-bridge의 각 스위치가 온/오프 모든 스위칭 동작에서 소프트 스위칭이 가능함을 확인 하였다. 또한 500[W]급 시작품의 실험을 통하여 시험한 결과 최대 효율 95.53%의 효율을 얻을 수 있었다. 이와 같은 새로운 스위칭 방식의 절연형 Full-Bridge DC/DC 컨버터는 리액터와 커패시터의 감소와 손실저감으로 고품질의 전력변환기 기술개발을 이룰 수 있을 것으로 사료된다.

지역혁신인력양성사업

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참 고 문 헌

- [1] J.G.Cho, "Zero-voltage and Zero-current-switching full-bridge PWM converter for high power applications", *IEEE*, Vol. 11, Issue 4, pp. 622-628, 1996, July.
- [2] Xiaolin Gao, Raja Ayyanar, "A High-Performance, Intergrated Magnetics Scheme for Buck-Cascaded Push-Pull Converter", *IEEE Power Elect.*, Vol. 2, No.1, pp. 29-33, 2004, March.
- [3] Jain, M.; Jain, P.K.; Daniele, M, "Analysis of a bi-directional DC-DC converter topology for low

power application", *IEEE 1997 Canadian Conference on*, Vol. 2, pp. 548-551, 1997, May 25-28.

- [3] C. Gerster, "Fast high-power high-power switch using series-connected IGBT's with active gate-controlled voltage-balancing", in *Proc. IEEE APEC'94*, pp. 469-472, 1994.
- [4] 손경중, 송성근, 최준호, 문채주, 김광현, 임영철 "영전압 영전류 스위칭을 이용한 연료전지용 전력변환시스템", *전력전자학회 논문지*, 제11권, 제4호, pp. 385-394, 2006, 8.

저 자 소 개



김승룡(金昇龍)

1983년 8월 6일생. 2009년 호남대 전기공학과 졸업. 2011년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 (주)고아정공 모터기술연구소 연구원.



선한걸(宣漢杰)

1980년 12월 27일생. 2006년 호남대 전기공학과 졸업. 2008년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 1월~2010년 5월 (주)지능형빌딩시스템기술연구소 연구원. 2010년 6월~현재 (주)고아정공 모터기술연구소 선임연구원.



한만승(韓萬勝)

1969년 10월 5일생. 1992년 원광대 전기공학과 졸업. 2009년 전남대 전기공학과 졸업(석사). 1996년~2009년 6월 대우일렉트로닉스 연구소 책임연구원. 2009년~현재 (주)고아정공 모터기술연구소 수석연구원. 2010년~현재 전남대 대학원 전기공학과 박사과정.



박성준(朴晟濬)

1965년 3월 20일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년 3월~2000년 2월 거제대학 전기과 조교수. 2000년 3월~2003년 8월 동명대학 전기공학과 조교수. 2003년 8월~현재 전남대 전기공학과 부교수.