

# 승강압용 양방향 DC-DC컨버터 설계 및 제어

(Bi-directional DC-DC Converter Design and Control for step-up/step-down)

장수진 · 이태원 · 이병국 · 원충연\* · 김수석

(Su-Jin Jang · Tae-Won Lee · Byoung-Kuk Lee · Chung-Yuen Won · Soo-Suck Kim)

## 요 약

양방향 컨버터는 연료전지 발전 시스템의 인버터 dc link와 저전압 배터리를 연결시켜 준다. 방전 모드(boost)에서는 저전압(battery: 48[V])측에서 고전압(dc link: 380[V])측으로, 충전 모드(buck)에서는 저전압측 배터리로 전력이 전달된다.

본 논문에서는 방전모드 시 MOSFET으로 구성된 1.5[kW] 능동 클램프 전류원 풀 브리지 컨버터가 동작하고 배터리 충전 시 IGBT로 구성된 전압원 하프 브리지 컨버터가 동작한다.

## Abstract

The bi-directional converter interfaces the low voltage battery to the inverter dc link of FC generation system. When power flows from the low voltage side (battery: 48[V]) to the high voltage side (dc link: 380[V]), the circuit works in discharge mode (boost) to power the high voltage side load; otherwise, it works in charge mode (buck) to charge the low voltage side battery.

In this paper, the 1.5[kW] active clamp current-fed full bridge converter employing MOSFETs is operated to discharge the battery whereas a voltage-fed half bridge converter employing IGBTs is operated to charge the battery.

Key Words : Bi-directional converter, current-fed full bridge, voltage-fed half bridge

## 1. 서 론

최근 대체에너지로서 관심을 받고 있는 연료전지는 기존의 직류전원과는 달리 강한 비선형성과 느린 동특성 및 낮은 출력전압의 특성을 갖기 때문에 기

존의 전력 변환 장치를 그대로 이용해서는 연료전지를 운전하는데 상당한 문제점 및 어려움을 지니게 된다.

또한 연료전지는 수십~수백 [Watt/분]의 매우 낮은 응답속도를 가지므로 부하 증가 시 배터리나 슈퍼커패시터와 같은 별도의 에너지 저장장치로부터 필요한 전력을 공급받지 않으면 출력전압의 조정이 어렵다[1].

배터리를 적용하여 에너지 저장장치를 구성할 경

\* 주저자 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수  
Tel : 031-290-7115, Fax : 031-290-7179  
E-mail : won@yurim.skku.ac.kr  
접수일자 : 2006년 1월 9일  
1차심사 : 2006년 1월 16일  
심사완료 : 2006년 2월 1일

## 승강압용 양방향 DC-DC컨버터 설계 및 제어

우 적용 위치에 따라 다양한 방법이 있다. 고전압 배터리 배크를 이용하여 dc link에 병렬로 연결하는 방식과 저전압 배터리를 연료전지 출력에 병렬로 연결하는 방식의 경우 배터리 전압의 불균형과 충/방전이 자유롭지 못하다는 단점이 있다[1].

이에 따라 최근 에너지 및 전력을 제어하기 위해 저전압 배터리를 충/방전 제어할 수 있는 양방향 dc-dc 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

양방향 컨버터 토폴로지는 크게 비절연형과 절연형으로 구분할 수 있다. 비절연형의 경우 동기정류 방식의 벅/부스트 컨버터가 있다. 이러한 컨버터의 경우 입출력의 전압차가 크지 않고 절연이 필요 없는 시스템에 적합하다[2].

하지만 양방향 컨버터를 적용한 저전압 배터리 시스템의 경우 입력과 출력의 차가 크기 때문에 변압기의 권선비로 승압할 수 있는 절연형 타입이 유리하다[1].

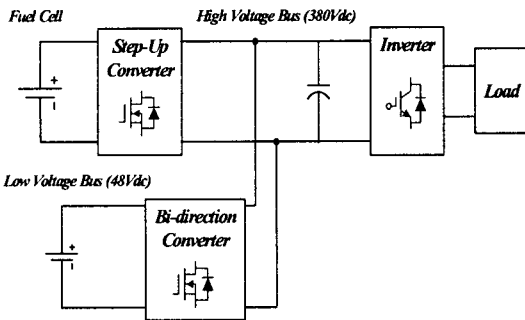


그림 1. 제안된 연료전지 발전 시스템  
Fig. 1. Proposed FC generation system

제안된 연료전지 발전시스템은 연료전지와 승압용 컨버터, 단상인버터, 배터리를 충/방전 제어하기 위한 양방향 컨버터로 그림 1과 같이 구성된다.

본 논문에서는 저전압 배터리(48[Vdc])를 이용한 1.5[kW]급 양방향 dc-dc 컨버터를 제안한다. 양방향 컨버터는 방전 모드(boost)와 충전 모드(buck)로 구분되어 동작한다. 방전 모드(boost) 시 MOSFET으로 구성되어진 능동 클램프 풀 브리지 컨버터가 동작하고, 충전 모드(buck) 시에는 IGBT로 구성되어진 하프브리지 컨버터가 동작하도록 설계/제작하였

다. 그림 2는 제안된 양방향 dc-dc 컨버터의 모습을 나타내고 있다. 배터리, 클램프 커패시터, 클램프 스위치, 풀 브리지, 하프 브리지 등으로 구성된다.

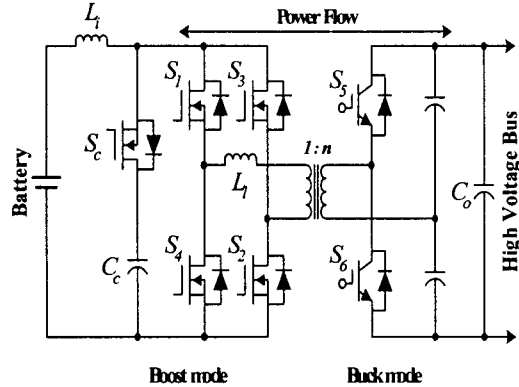


그림 2. 제안된 양방향 dc-dc 컨버터  
Fig. 2. Proposed bi-directional dc-dc converter

## 2. 제안된 양방향 dc-dc 컨버터

### 2.1 절연형 양방향 dc-dc 컨버터

절연형 풀 브리지 컨버터는 스위치의 턴-오프 시 스위치에 흐르던 전류가 변압기의 누설 인덕터에 의해 갑자기 전류의 방향을 바꿀 수 없기 때문에 급격한 전압 변화가 생긴다. 이러한 갑작스런 전압의 증가는 소자의 파손을 가져올 수 있고 고주파 동작에서의 스위칭 손실을 발생 시키며 심각한 노이즈 발생의 근원으로 작용한다[3-5].

따라서 스위치를 턴-오프하여 전류의 흐름을 차단할 때 전류가 흐를 수 있는 통로를 마련해야 한다. 이러한 목적으로 스너버 회로가 제안 되었다.

그러나 저항과 커패시터로 이루어진 RCD 스너버는 저항에서의 손실로 인하여 대전력 응용에는 적합하지 않다. 그리하여 스위치와 커패시터로만 이루어진 능동 클램프 회로가 제안되었다.

능동 클램프 방법은 추가적인 스위치 소자를 쓰지 만 수동 클램프 방법에 비해 회로 구현이 간단하며 효율이 좋아 연료전지 시스템과 같은 대전력 응용에 적합하다[6-8].

## 2.2 양방향 dc-dc 컨버터의 방전 모드 (boost)

양방향 dc-dc 컨버터는 1차측(저전압)에서 2차측(고전압)으로 에너지가 전달될 때 방전 모드(boost)로 동작하게 된다.

풀 브리지 컨버터의 스위치( $S_{1,4}$ ), 클램프 커패시터( $C_c$ ), 클램프 스위치( $S_c$ )가 동작하고 2차측(고전압) 스위치( $S_{5,6}$ )의 내부 다이오드에 의해 정류된다. 그림 3은 방전 모드(boost) 시 전력 흐름을 나타낸다.

주 스위치( $S_{1,4}$ )는 통류율 0.5이상으로 동작하며 주 스위치가 모두 턴-온 일 때 에너지를 저장하고, 스위치( $S_1, S_2$ )나 ( $S_3, S_4$ )가 턴-오프 될 때 2차측으로 에너지를 전달시킨다.

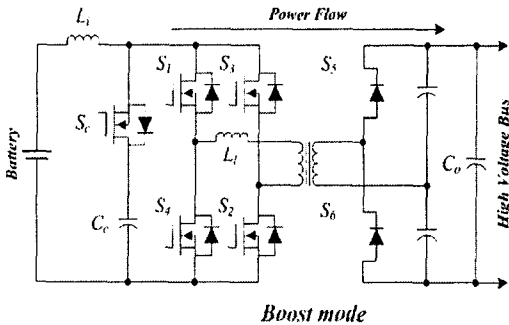


그림 3. 양방향 dc-dc 컨버터의 방전 모드(boost)  
Fig. 3. Discharging mode(boost) of bi-directional dc-dc converter

이 회로의 주된 특징은 모든 스위치가 영전압 스위칭(ZVS) 동작을 하며, 스위치 전압이 클램프 커패시터에 걸리는 전압으로 클램프 된다. 변압기의 누설 인덕터와 스위치의 기생 커패시터를 공진 요소로 사용하여 모든 스위치들이 ZVS 동작을 한다[9-11].

그림 4는 방전 모드(boost)일 때의 각부 파형을 나타내고 있다.  $S_{1,4}$ 는 주 스위치의 게이트 신호, SC는 클램프 스위치의 게이트 신호를 나타낸다.

$I_{S1}$ 은 주 스위치에 흐르는 전류를 나타내고  $I_p$ 는 누설 인덕터에 흐르는 전류,  $I_c$ 는 클램프 커패시터에 흐르는 전류를 나타내고 있다.

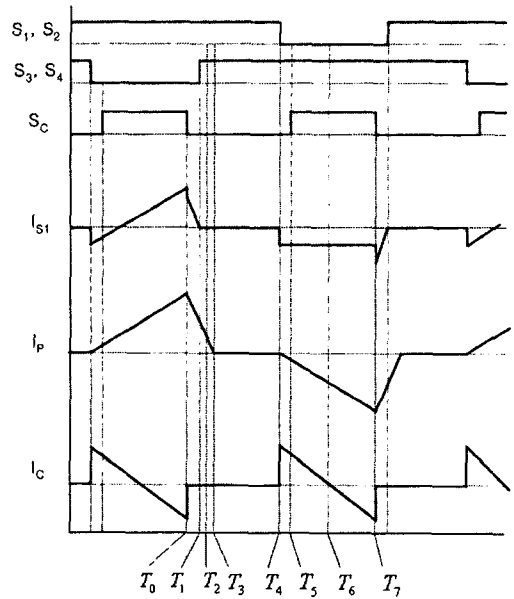


그림 4. 방전 모드(boost) 시 각부 파형  
Fig. 4. Timing diagram at discharging mode(boost)

## 2.3 양방향 dc-dc 컨버터의 충전 모드 (buck)

연료전지는 에너지 발생장치로서 에너지 저장 능력이 없기 때문에 배터리와 같은 에너지 저장 장치가 필요하다.

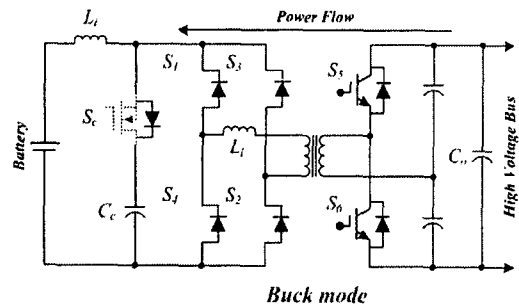


그림 5. 양방향 dc-dc 컨버터의 충전 모드(buck)  
Fig. 5. Charging mode(buck) of Bi-directional dc-dc converter

그림 5는 충전 모드(buck) 시 회로를 나타내고 있다. 양방향 dc-dc 컨버터는 2차측(고전압)에서 1차측(저전압)으로 에너지가 전달될 때 충전 모드(강압)

### 승강압용 양방향 DC-DC컨버터 설계 및 제어

로 동작하게 된다. 하프 브리지 컨버터의 스위치 ( $S_{5,6}$ )가 동작하고 1차측(저전압) 스위치( $S_{1,4}$ )의 내부 다이오드에 의해 정류된다.

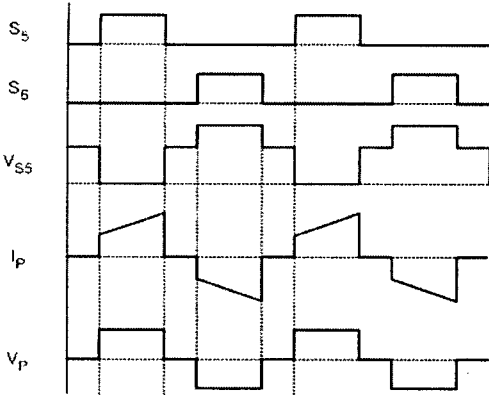


그림 6. 충전 모드(buck)시 각부 파형  
Fig. 6. Timing diagram at charging mode(buck)

그림 6은 충전 모드(buck) 시 각부 파형을 나타내고 있다.  $S_{5,6}$ 은 충전 모드(buck) 시 하프 브리지 스위치의 게이트 파형을 나타내고,  $V_{S5}$ 는 스위치  $S_5$ 에 걸리는 전압,  $I_p$ 는 변압기에 흐르는 전류를,  $V_p$ 는 변압기에 걸리는 전압을 나타내고 있다.

### 3. 시뮬레이션 결과

표 1의 파라미터 값을 이용하여 시뮬레이션을 하였으며, 1.5[kW]급의 양방향 dc-dc 컨버터를 설계/제작하여 실험 하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameter

Clamp capacitance	3.5[ $\mu$ F]
Switching frequency	25[kHz]
High frequency transformer	1 : 3.5
Battery voltage(Low side)	48~55[Vdc]
Output voltage(High side)	380[Vdc]
Leakage inductance	13[ $\mu$ H]

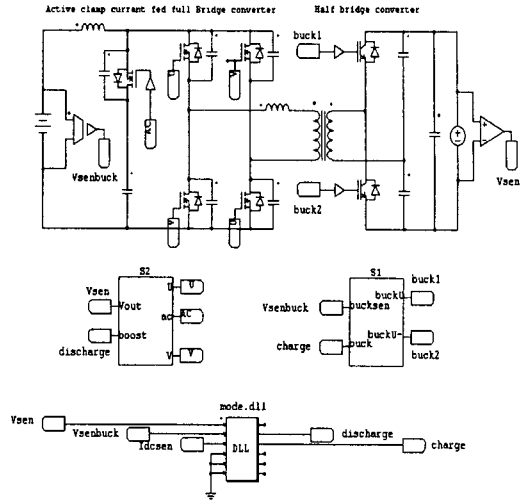


그림 7. 양방향 dc-dc 컨버터의 시뮬레이션 회로도  
Fig. 7. Simulation circuit diagram of the bi-directional dc-dc converter

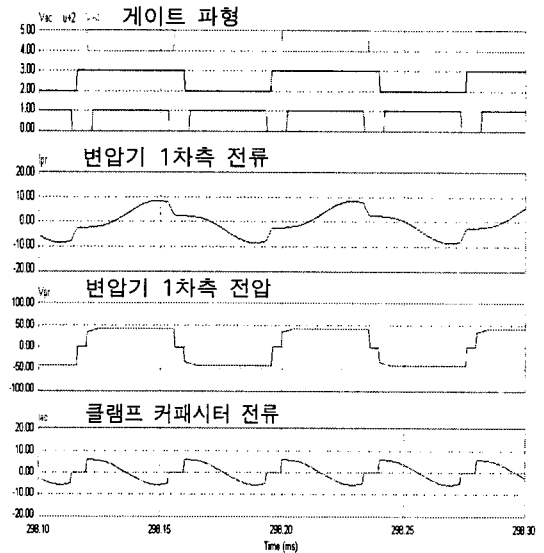


그림 8. 방전 모드 시 각부 파형  
Fig. 8. The overall waveform at discharging mode

그림 7은 양방향 dc-dc 컨버터의 시뮬레이션 회로도이다. 시뮬레이션은 PSIM의 DLL을 사용하여 방전 모드(boost)와 충전 모드(buck)로 운전하도록 제어하였다.

그림 8은 방전 모드(boost) 시의 각부 파형을 나타

내고 있다. 능동 클램프 회로의 영향으로 고주파 변압기의 파형은 오버슈트나 링잉이 발생하지 않음을 확인 할 수가 있다.

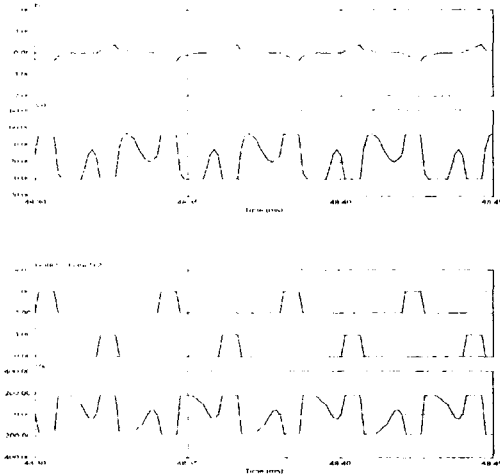


그림 9. 충전 모드 시 각부 파형  
Fig. 9. The overall waveform at charging mode

그림 9는 충전 모드(buck) 시 각부 파형을 나타내고 있다. 주 스위치( $S_6$ )는 통류율 0.5 이하로 동작한다. 변압기의 전압과 전류, 다이오드전압의 시물레이션 파형을 나타내고 있다.

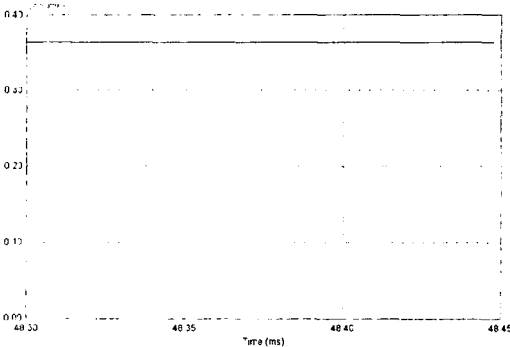


그림 10. 배터리 충전전류(충전 모드)  
Fig. 10. Batter charge current(charging mode)

그림 10은 양방향 dc-dc 컨버터의 충전 모드

(buck) 시 배터리 충전 전류 파형을 나타내고 있으며, 제한한 양방향 dc-dc 컨버터가 배터리를 안정적으로 충전 시키고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 실험 결과

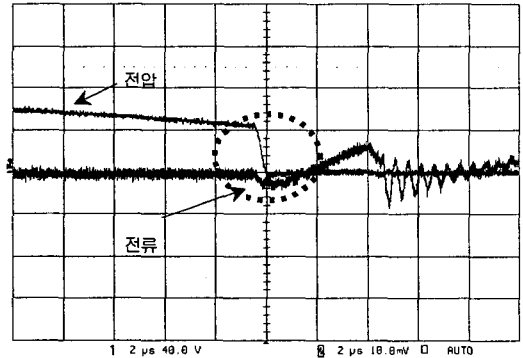


그림 11. 주 스위치의 전압/전류 파형(방전 모드)  
Fig. 11. Voltage and current waveform of main switch(discharging mode)(40(V/div), 5(A/div), 2(us/div))

그림 11은 방전 모드(boost) 시 능동클램프 전류 원 풀 브리지 컨버터의 스위치 전압/전류 실험 파형을 나타낸다.

전류가 음으로 흐르는 파형은 스위치의 내부 다이오드를 통해서 전류가 흐르고 있음을 알 수 있다. 전류가 내부 다이오드를 통해서 흐를 때 스위치에 게이트 신호를 인가함으로써 ZVS 동작을 하게 된다.

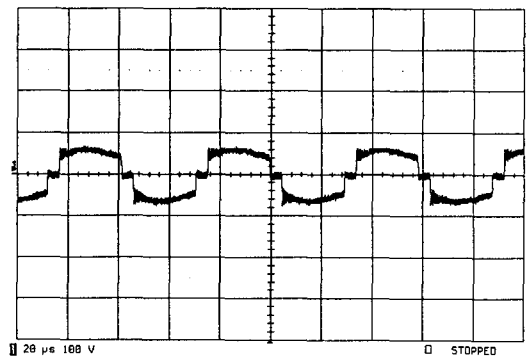


그림 12. 변압기 1차측 전압(방전 모드)  
Fig. 12. Transformer primary voltage(discharging mode)(100(V/div), 20(us/div))

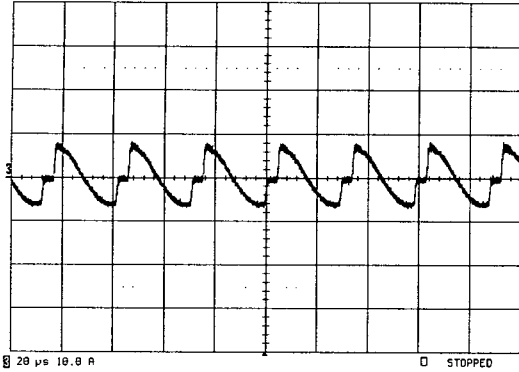


그림 13. 클램프 커패시터 전류(방전 모드)  
Fig. 13. Clamp capacitor current(discharging mode)(10(A/div), 20(μs/div))

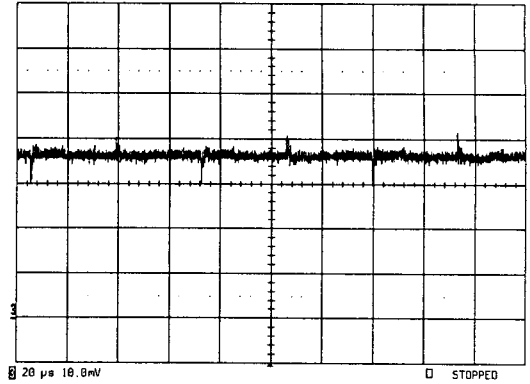


그림 16. 배터리 충전전류(충전 모드)  
Fig. 16. Batter charge current(charging mode) (0.1(A/div), 20(μs/div))

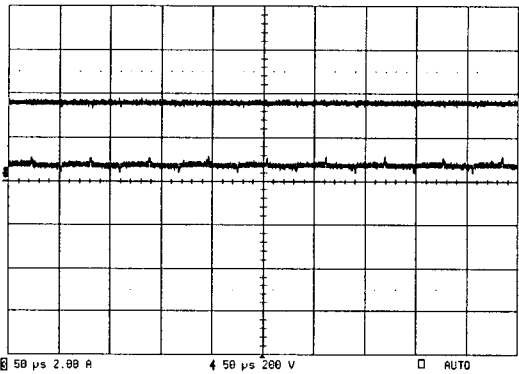


그림 14. 컨버터 출력전압(상), 전류(하)(방전 모드)  
Fig. 14. Output voltage and current(discharging mode)(200(V/div), 2(A/div), 50(μs/div))

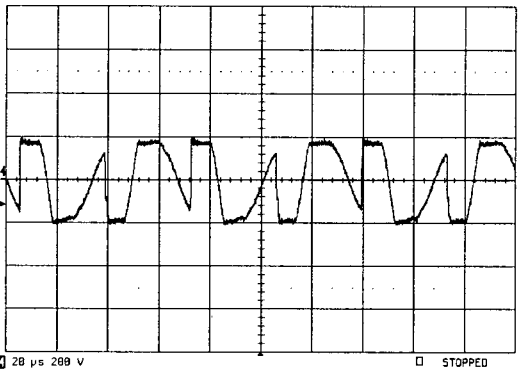


그림 15. 변압기 2차측 전압(충전 모드)  
Fig. 15. Transformer secondary voltage(charging mode)(200(V/div), 20(μs/div))

그림 12와 13은 고주파 변압기의 양단 전압과, 클램프 커패시터의 충/방전 전류 파형을 나타내고 있다.

클램프 커패시터에 충전된 전압만큼 주 스위치 및 변압기에 걸리는 전압이 클램프 되고 있음을 확인할 수 있다.

능동 클램프 전류원 풀 브리지 컨버터를 사용하여 저전압 배터리 전압(48[Vdc])을 적은 턴수비(1 : 3.5)로 고전압(380[Vdc])으로 승압시킬 수 있음을 그림 14의 파형을 통해 확인할 수 있다.

그림 15는 충전 모드(buck) 시 변압기의 전압을 나타내며, 그림 16은 배터리의 충전 전류를 나타내고 있다. 제안한 컨버터가 충전 모드 시 안정적으로 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 17은 방전 모드(boost) 시 제안한 컨버터의 효율을 나타내고 있다. 방전 모드(boost) 시 90~95[%] 이상, 충전 모드(buck)의 경우 95[%] 이상의 효율을 얻을 수 있었다.

그림 18은 양방향 dc-dc 컨버터의 실험 시스템을 나타낸다. 1차측 능동 클램프 전류원 풀 브리지 컨버터와 2차측 전압원 하프 브리지 컨버터로 구성되며, 컨버터를 구동하기 위한 게이트 드라이브, 7개의 PWM 신호를 만들기 위한 EPLD부로 구성된다.

그리고 방전 모드(boost) 및 충전 모드(buck)를 제어하기 위한 DSP 제어부(TMS320C31)로 구성하였다.

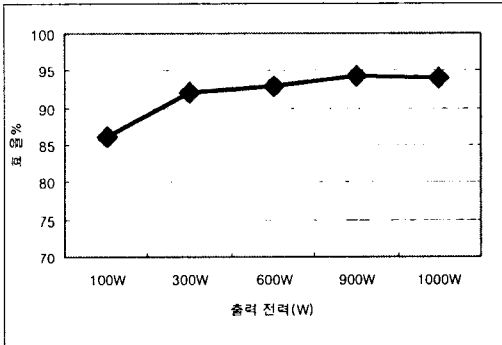


그림 17. 방전 모드 시 효율  
Fig. 17. Efficiency at discharging mode

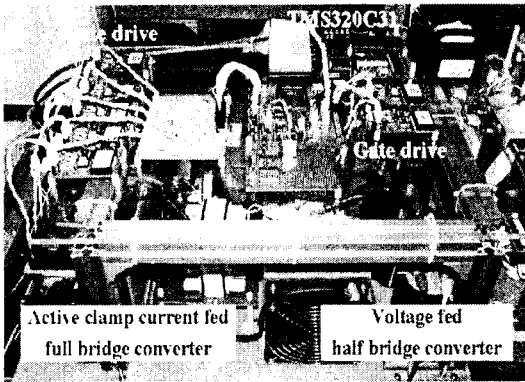


그림 18. 양방향 dc-dc 컨버터의 실험 시스템  
Fig. 18. Experimental system of bi-directional dc-dc converter

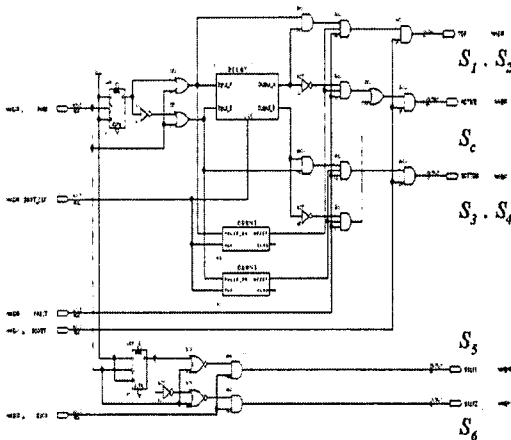


그림 19. 양방향 dc-dc 컨버터의 PWM 발생장치  
Fig. 19. PWM generator of bi-directional dc-dc converter

그림 19는 양방향 dc-dc 컨버터를 구동하기 위한 7개의 PWM 신호를 발생시켜 주는 EPLD 내부회로를 나타내고 있다.

## 5. 결 론

연료전지는 강한 비선형성과 느린 동특성 및 낮은 출력 전압의 특성과 수십~수백 [Watt/분]의 매우 낮은 응답 속도를 갖는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결할 수 있는 저전압 배터리를 이용한 고효율 양방향 dc-dc 컨버터를 제안하였다.

전압형 컨버터를 적용할 경우 1 : 13 이상의 높은 권선비가 필요하지만 본 논문에서 제안한 전류형 컨버터의 경우 1 : 3.5의 낮은 권선비를 얻을 수 있다.

실험 및 시뮬레이션을 통하여 양방향 dc-dc 컨버터의 최적 토폴로지 선정 및 고효율의 컨버터 설계에 대한 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 배터리의 저전압을 380[V]이상의 고전압으로 승압시킬 경우에는 전류형 컨버터를 사용함으로써 고주파 변압기의 승압비를 낮추는 방식이 유리함을 실험 및 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.
- 2) 소프트 스위칭을 적용하여 스위칭 스트레스 및 스위칭 손실을 저감시켜 효율을 개선하였다.
- 3) 클램프 회로의 동작으로 주 스위치에 걸리는 전압은 클램프 커패시터 전압으로 클램프 되기 때문에 낮은 정격의 스위치를 사용할 수 있다.

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축 지원사업으로 수행된 논문입니다.

## References

- (1) 최세완, "연료전지 발전 시스템에서의 전력전자 기술", 전력전자 학회지, vol.8, pp. 30-35, 2003.
- (2) 이우철, 유창규, "방향 절환이 자유로운 양방향 DC/DC 컨버터 개발", 전력전자학회 추계학술대회, pp. 41-44, 2004.
- (3) E. Snati, E. Franzoni, A. Monti, D. Patterson, F. Ponci and N. Barry, "A Fuel Cell Based Domestic Uninterruptible Power Supply," IEEE-APEC Conf. Rec., pp. 605-613, 2002.
- (4) M. W. Ellis, M. R. V. Spakovsky and D. J. Nelson, "Fuel

## 승강압용 양방향 DC-DC컨버터 설계 및 제어

- Cell Systems: Efficient, flexible Energy Conversion for the 21st Century," Proc. IEEE, pp. 1808-1818, 2001.
- [5] M. Yamaguchi, T. Saito, M. Izumitani, S. Sugita and Y. Tsutsumi, "Analysis of Control Characteristics Using Fuel Cell Plant Simulator," IEEE Trans. on Industrial Electronics, no.5, vol.37, pp. 378-386, October 1990.
- [6] W. Choi, P. Enjeti and J. W. Howze, "Fuel Cell Powered LPS Systems: Design Considerations," IEEE-PESC Conf. Rec., pp. 385-390, 2003.
- [7] W. Kunrong, F. C. Lee and J. Lai, "Operation Principles of Bi-directional Full-bridge DC/DC Converter with Unified Soft-Switching Scheme and Soft-Starting Capability," IEEE-APEC Conf. Rec., pp. 111-118, 2000.
- [8] L. M. Tolbert, W. A. Peterson, C. P. White, T. J. Theiss and M. B. Scudiere, "A Bi-directional DC-DC Converter with Minimum Energy Storage Elements," IEEE-IAS Conf. Rec., pp. 1572-1577, 2002.
- [9] V. Yakushev, V. Meleshin and S. Fraidlin, "Full-bridge Isolated Current Fed Converter with Active Clamp," IEEE-APEC Conf. Rec., pp. 560-566, 1999.
- [10] S. Yujin and P. N. Enjeti, "A New Soft Switching Technique for Bi-directional Power Flow, Full-bridge DC-DC Converter," IEEE-IAS Conf. Rec., pp. 2314-2319, 2002.
- [11] T. Reimann, S. Szeponik, G. Berger and J. Petzoldt, "A Novel Control Principle of Bi-directional DC-DC Power Conversion," IEEE-PESC Conf. Rec., pp. 978-984, 1997.

## ◇ 저자소개 ◇

### 장수진 (張水珍)

1976년 12월 6일생. 2002년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 성균관대 대학원 에너지시스템공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정.

### 이태원 (李泰遠)

1971년 7월 14일생. 2000년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2002년~현재 동 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정.

### 이병국 (李秉國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(박사). 2001~2003년 미국 Texas A&M University Postdoctoral Research Associate. 2003~2005년 한국전기연구원 전력전자그룹 선임연구원. 2005~2006년 성균관대학교 연구조교수. 2006년~현재 성균관대 정보통신공학부 조교수. IEEE Senior Member.

### 원충연 (元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 현재 성균관대 정보통신공학부 교수. IEEE Senior Member. 본 학회 편수위원.

### 김수석 (金漱石)

1959년 1월 16일생. 1984년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 서울산업대 전기공학과 조교.