

연료전지 자동차 전장전원용 고효율 양방향 3상 DC-DC 컨버터

윤창우*, 김형준*, 최세완*, 강호성**, 이현동**

* 서울산업대학교, ** 현대자동차

A High Efficiency Bidirectional Three-Phase DC-DC Converter for Auxiliary Power Supply of Fuel Cell Vehicles

Changwoo Yoon*, Hyungjoon Kim*, Sewan Choi*,
Hosung Kang**, Hyundong Lee**

* Seonul National University of Technology, ** Hyundai-Motor Company

ABSTRACT

본 논문에서는 연료전지자동차의 저전압 배터리 충·방전을 위한 새로운 3상 양방향 DC-DC 컨버터를 제안한다. 12V 저전압측의 높은 전류정격 때문에 기존의 풀브리지 방식으로는 적절한 스위치의 선정이 어렵지만 제안한 3상의 전류분배로 스위치의 선정과 변압기의 제작이 용이하다. 그리고 제안한 변압기 결선으로 턴비가 작아져 누설인덕턴스가 작아진다. 또한 비대칭 PWM에 의한 모든 스위치의 ZVS 턴온과 저전압 측에서는 동기정류 방식을 적용하여 효율을 상승시켰다. 제안하는 컨버터의 동작원리를 기술하고 3.5kW 시제품을 제작하여 실험을 통해 본 방식의 타당성을 검증한다.

1. 서론

그림 1의 연료전지 자동차 전기동력 시스템에서 연료전지와 구동 인버터 사이의 고전압 직류단에 전장전원용 저전압 배터리를 연결하기 위하여 양방향 DC-DC 컨버터가 사용되고 있다. 이러한 양방향 컨버터의 2가지 주된 기능은 초기 기동 시 양방향 DC-DC 컨버터의 승압 동작으로 배터리를 방전하여 연료전지의 기동에 필요한 주변장치에 전원을 공급하는 것이고, 연료전지가 동작하는 주행 시나 회생 동작 시 양방향 DC-DC 컨버터의 강압 동작으로 배터리 충전 및 자동차 전장부에 전원을 공급하는 것이다. 이 양방향 컨버터 설계 시 가장 큰 제약조건은 연료전지의 넓은 전압변동과 컨버터의 큰 입·출력전압차 인해 컨버터의 전압전달비가 20~40배로 매우 크게 요구되는 것이다.^[1,2,3] 그래서 위상천이 풀브리지 방식으로는 과도한 턴비와 큰 소자 정격 때문에 설계 요건을 만족하기 어렵다. 그리고 차량 내 제한된 부피를 만족시

키기 위해 높은 전력밀도를 가져야 하며 시스템의 연비와 방열방식을 고려해 높은 효율을 유지해야 한다. 또한 고신뢰성 및 낮은 생산단가등도 중요한 고려사항이다.

이와 같은 자동차 응용에 적합한 양방향 DC-DC 컨버터의 토폴로지는 2단(Two-stage) 방식^[4] 및 3상(Three-phase) 방식^[6,7,8,9] 컨버터로 분류할 수 있다. 2단 방식의 컨버터는 절연형 컨버터에 비절연형 컨버터가 추가되는 형태로 절연부에 고정 듀티(D=0.5)를 적용하여 최적설계가 가능하고 변압기의 턴비가 작아지는 장점을 갖는다. 그러나 비절연부의 추가로 소자수가 늘어나는 단점이 있으며 2단의 전력변환으로 인하여 고효율 달성에 한계가 있다.^[5] 3상 컨버터는 컨버터 용량이 큰 경우 소자의 전류분배효과로 낮은 전류정격 소자를 사용할 수 있어 유리하며, 인터리빙의 효과로 입출력 유효주파수가 증가하여 수동소자의 크기가 작아지는 장점이 있다.

대표적인 기존의 3상 양방향 DC-DC 컨버터로서 IGBT를 사용하는 위상제어 방식^[6]이 있다. 이 컨버터는 변압기 1·2차 측 간의 위상차에 의해 전력 흐름을 제어하는 방식으로 구성이 간단하나 입력 전압 변동 폭이 큰 연료전지와 같은 응용에서는 위상각이 커져 무효전력에 의한 전류정격과 입·출력 리플전류가 크게 증가하게 되는 단점이 있다.

본 논문에서는 비대칭 PWM 제어방식의 고효율 3상 양방향 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안하는 방식은 2단 방식에 비해 간단한 구성으로 큰 용량의 전력변환을 효과적으로 할 수 있으며 위상제어 방식^[6]과 달리 입·출력전압변동에 의해 전류정격이 증가하는 문제가 없다. 또한 제안한 3상 변압기 결선으로 작은 턴비와 낮은 VA정격을 얻을 수 있다. 그리고 비대칭 PWM에 의한 ZVS 턴온과 저전압 측에서는 동기정류 방식을 적용하였다. 제안하는 컨버터의 동작원리를 기술하고 3.5kW 시제품을 제작하여 실험을 통해 본 방식의 타당성을 검증한다.

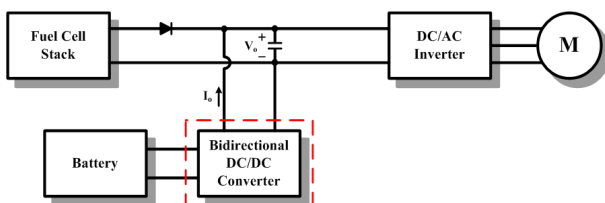


그림 1 연료전지 자동차의 전기동력 시스템

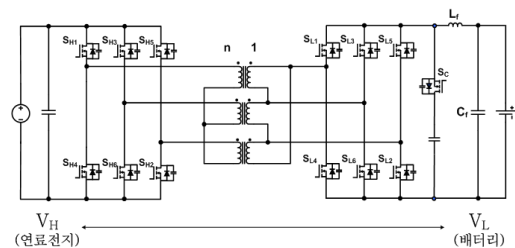


그림 2 제안하는 3상 양방향 컨버터

표 1 변압기 결선에 따른 변압기 정격 비교(단, 변압기 한 개당 정격임)

	Full Bridge	Y-Y	$\Delta-\Delta$	Y- Δ
결선구조				
턴비(n)	1 p.u.	1 p.u.	1 p.u.	$\frac{2}{3}$ p.u.
VA 정격	1 p.u.	0.38 p.u.	0.4 p.u.	0.33 p.u.

2. 제안하는 컨버터의 동작원리

제안하는 양방향 3상 DC-DC 컨버터는 그림 2에서와 같이 고전압, 저전압단 각각에 6개의 MOSFET 스위치와 Y- Δ 형으로 결선된 3상 고주파 변압기, 클램프 회로, 저전압단의 LC 필터로 구성된다.

3상 변압기는 표 1과 같이 Y-Y, $\Delta-\Delta$, Y- Δ 로 구성할 수 있는데 본 응용에서는 다음 두 가지 측면을 고려하여 Y- Δ 결선을 선정하였다. 첫째, 강압응용에서 Y- Δ 결선은 변압기 턴비를 가장 작게 설계 할 수 있어 누설인덕턴스로 인한 듀티 손실, 스위치의 전류정격의 증가 및 정류 다이오드의 전압 서지 문제를 줄일 수 있다. 둘째, Y- Δ 결선의 스위치 전류 정격 및 변압기 VA정격이 가장 작다.

기존 풀브리지는 단일 변압기로 에너지를 전달하므로 큰 부하전류가 하나의 스위치와 변압기로 항상 흘러 도통손실이 크다.

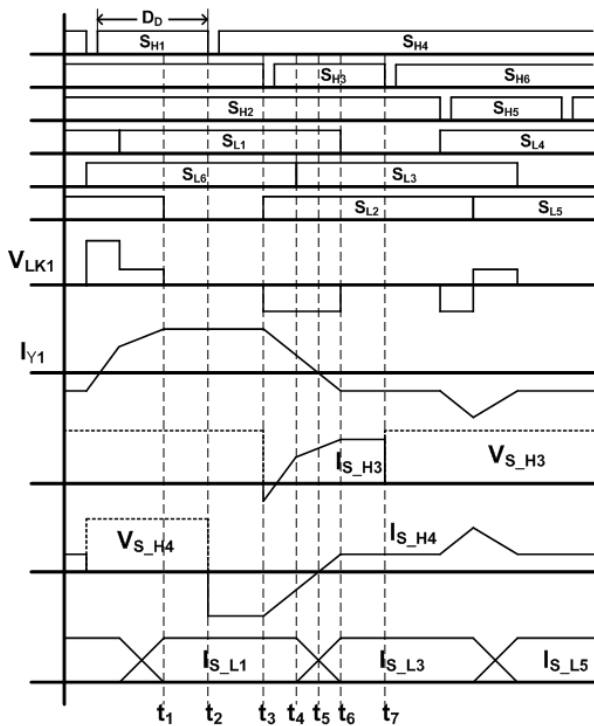


그림 3. 배터리 충전모드의 주요 파형

하지만 제안하는 3상 Y- Δ 결선 방식은 전체 전류가 각 상으로 분할되어 흐르기 때문에 변압기 실효 전류가 감소되어 동손을 줄일 수 있다. 이 때문에 변압기 제작에 용이하며, 대전류단의 스위치 정격 또한 기존 풀브리지에 비해 80%정도로 작아 소자의 선택이 유리하다.

2.1 충전모드

고전압 측 각 레그는 서로 120° 의 위상차를 가지고 각 레그의 스위치는 비대칭으로 상보적(Complementary) 스위칭을 한다. 스위치가 턴오프 될 때 변압기의 누설 인덕턴스의 에너지로 반대 쪽 스위치의 내부 다이오드를 도통시킨 후 메인 채널이 ZVS 턴온 스위칭이 이루어지는 방식이다.

또한 고전압단 각 스위치에 병렬로 커패시터를 추가하여 준구형파(Quasi-square Wave) 방식의 영전압 턴오프 스위칭의 적용도 가능하다^[9]. 저전압 측 스위치는 고전압 측 스위치의 동작에 따라 동기정류 동작을 하여 대전류측의 도통손실뿐 아니라 ZVS 턴온동작으로 스위칭 손실도 저감 하였다. 충전모드의 주요파형과 스위치 S4의 ZVS 턴온을 보여주는 구간별 동작을 각각 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 동기정류 게이트는 저전압측 변압기 전압을 센싱하여 I_{SL} 의 도통구간동안 도통시킨다.

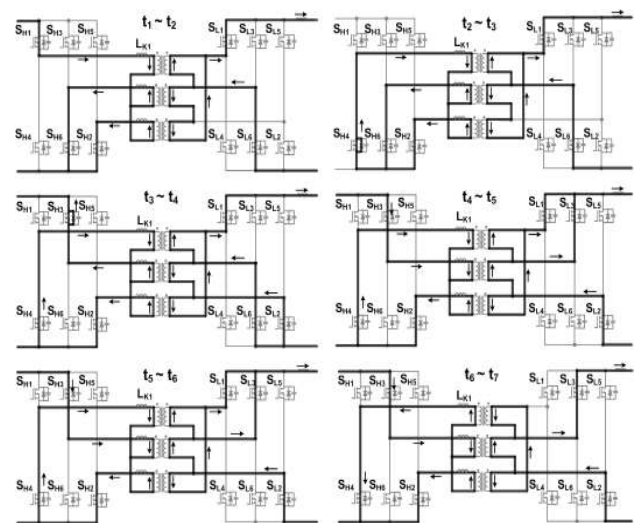


그림 4. 배터리 충전 동작모드

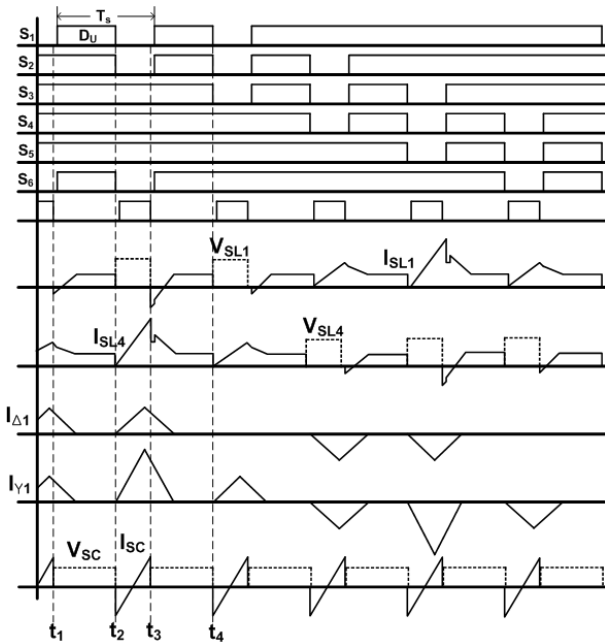


그림 5. 배터리 방전모드의 주요 파형

2.2 방전모드

제안하는 컨버터의 방전 모드에서는 저전압측이 전류원 컨버터로서 오버랩 타임을 가지며 스위칭을 한다^[10]. 6개 스위치가 모두 ON되어 인덕터를 충전하고 3개의 스위치가 OFF되어 인덕터를 방전하는 방식으로 에너지를 전달한다. 이때 고전압 측 스위치는 동기정류 방식을 적용하여 도통손실을 최소화 하였다. 스위치가 OFF되어 있는 동안에 능동 클램프 S_c를 ON시켜 스위치의 전압 서지 제거 및 ZVS 턴온을 성취한다. 방전모드의 주요 파형과 스위치 S₄'의 ZVS 턴온을 보여주는 구간별 동작을 각각 그림 5 과 그림 6에 나타낸다. 방전모드에서는 저전압 측 스위치 듀티 비에 의해 고전압 측 전압이 제어되고 고전압 측 스위치는 동기정류기로 동작한다.

3. 설계 및 검증

본 논문에서 제안한 비대칭 양방향 3상 컨버터를 다음의 사양으로 설계하였다.

$$\begin{aligned} \cdot P_o &: 3.5 \text{ kW} & \cdot V_{in} &: 250 \sim 450 \text{ V} & \cdot V_{out} &: 12 \text{ V} \\ \cdot \Delta I_{in} &: 0.5 \text{ A} & \cdot \Delta I_{out} &: 5 \text{ A} & \cdot f_s &: 70 \text{ kHz} \end{aligned}$$

누설인덕턴스는 ZVS 영역을 기준으로 설계하는데 경부하에서도 스위치 턴온시 내부 커패시터 C_{oss}를 충분히 충·방전할 수 있는 인덕턴스 값이어야 한다. ZVS 턴온을 성취하기 위한 누설 인덕턴스 값은 다음의 식으로 구할 수 있다.^[8]

$$L_k \geq \frac{V_{H,max}^4}{P_o} \cdot (3D_{D,min})^2 \cdot \frac{2C_{oss}}{1.5} [\mu H] \quad (1)$$

변압기 턴비는 양방향 동작을 모두 고려하여 선정해야 한다. 식(2)에 양방향 모드를 모두 고려한 변압기 턴비를 나타내었다. 방전모드 시에는 최저 배터리 전압으로 연료전지 보조전원을

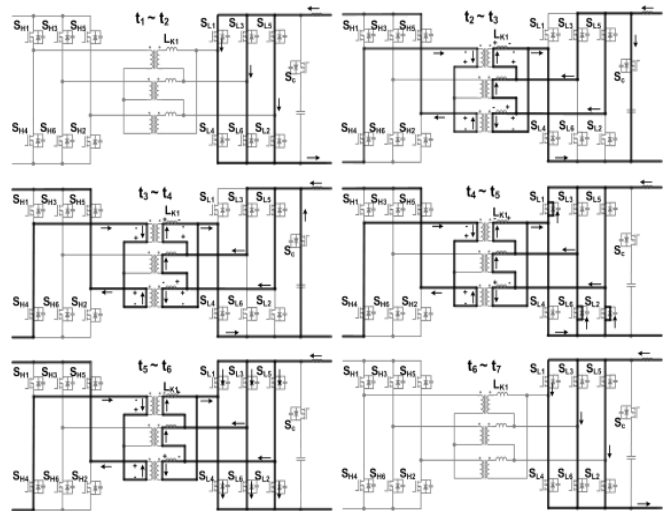


그림 6. 배터리 방전 동작모드

구동시킬 수 있는 전압으로 승압할 수 있는 변압기 턴비로 설계하였고, 충전 모드 시 연료전지 최대 전압이 인가 될 때 배터리 요구 전압인 14V를 만들어 줄 수 있도록 턴비를 설계하였다.

$$\frac{V_{H,ref}(1-D_U)}{V_{L,min}} < n < \frac{V_{H,max} + \sqrt{V_{H,max}^2 - 24 \cdot V_L}}{8 \cdot V_L} \quad (2)$$

설계된 정격으로 고전압 측 스위치는 SPP20N60C3, 저전압 측 스위치는 IRFB4310Pbfl를 선정하였고, 3상 변압기는 페라이트 재질을 3개 사용하여 구성하였다.

배터리 충·방전 시 동작 모드의 각부 스위치 전압, 전류 파형을 그림 7와 그림 8에 나타내었다. 그림 7(a)과 (b)는 각각 충전모드 시 고전압 측의 상·하측스위치 전압, 전류 실험파형이다. 상·하측 스위치 모두 ZVS 턴온을 성취하며 특히 하측 스위치는 넓은 ZVS 구간을 확인할 수 있다. 그림 8(a)와 (b)는

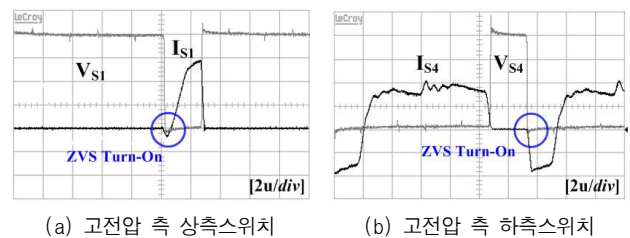


그림 7. 배터리 충전 시 주요 파형

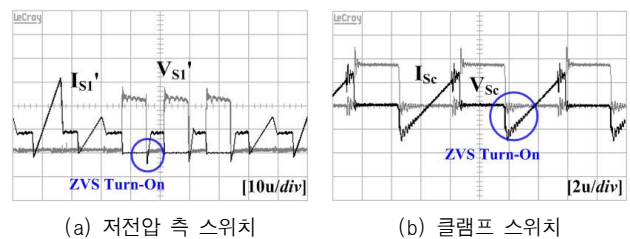


그림 8. 배터리 방전 시 주요 파형

방전모드 시 저전압 측 스위치와 클램프 스위치의 전압, 전류 파형이다. 방전 모드 시에도 모든 스위치에서 ZVS 턴온을 성취하는 것을 확인할 수 있다. 양방향 동작에서 모두 입력 측 스위치에서 ZVS 턴온 스위칭이 되는 것과 출력 측의 스위치에서 동기정류가 되는 것을 실험을 통해 확인하였다.

제안하는 3상 컨버터는 충전모드에서 고전압스위치의 ZVS 턴온 성취와, Y- Δ 결선에 의한 전류분배효과 및 실효전류 감소효과, 그리고 대전류측의 동기정류동작 등으로 최대효율 94.7%를 달성하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 연료전지자동차의 저전압 배터리 충·방전을 위한 새로운 3상 양방향 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안한 3상의 전류분배로 12V 저전압측의 높은 전류정격에서도 스위치의 선정과 변압기의 제작이 용이하게 되었다. 그리고 제안한 Y- Δ 변압기로 턴 비가 33% 작아져 누설인덕턴스를 줄일 수 있다. 또한 비대칭 PWM에 의한 모든 스위치의 ZVS 턴온과 저전압 측에서는 동기정류 방식을 적용하여 94.7%의 최대효율을 달성하였다. 3.5kW 시제품을 제작하여 실험을 통해 본 방식의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 현대자동차의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] 최세완, "특집 : 대체에너지 발전시스템에서의 전력전자기술 - 연료전지 발전시스템에서의 전력전자기술", *전력전자학회지*, 제6권, 제1호, pp.30-36, 2003년 8월.
- [2] 조진상, 정상민, 이진희, 최세완, 한수빈, "연료전지자동차에서 연료이용률과 연료전지 내구성 향상을 위한 양방향 DC-DC 컨버터의 제어기법", *전력전자학회 논문지*, 제10권, 제5호, pp.428-435, 2005년 10월.
- [3] 김형준, 양진영, 윤창우, 최세완, 강호성, 이현동 "자동차의 저전압 배터리 충방전을 위한 양방향 DC-DC 컨버터", *전력전자학회 논문집* pp. 178~181 2007년 7월.
- [4] F.Krismer, J.Biela, J.W.Kolar, "A Comparative Evaluation of Isolated Bi-directional DC/DC Converters with Wide Input and Output Voltage Range" in Proc. Ind. Applicat. Conf. 2005. 40th IAS Annual Meeting. Volume 1 Page(s):599 - 606
- [5] P.Alou, J.A. Cobos, J.Uceda, M.Rascon, E.de la Cruz, "Design of a low output voltage DC/DC converter for telecom application with a new scheme for self-driven synchronous rectification", in Proc. of IEEE APEC 1999, Page(s):866 - 872 vol.2
- [6] D. M. Divan and R.W. A. A. De Doncker, "A three phase soft switched high-power density dc/dc converter for high power applications," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 27, no. 1, pp. 63-73, Jan./Feb 1991.
- [7] P. D. Ziogas, A. R. Prasad, and S. Manias, "A three phase resonant PWM dc/dc converter," in Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp. 463-473 Jun. 24-27 1991.
- [8] Demercil S. Oliveira Jr. and Ivo Barbi, " A Three-Phase ZVS PWM DC/DC Converter with Asymmetrical Duty Cycle for High Power Applications" *IEEE PESC*, Vol.2, pp. 616-621, 2003.
- [9] Seung-Ryul Moon, Jih-Sheng Lai, "Multiphase Isolated DC-DC Converters for Low-Voltage High-Power Fuel Cell Applications," *Proc. of IEEE APEC 2007*, pp.1010-1016, Feb 2007.
- [10] Hanju Cha, Soonho Choi, Prasad Enjeti, "An advanced PWM strategy to improve efficiency and voltage transfer ratio of three-phase isolated boost dc/dc converter", *Proc. of IEEE APEC 2008* Page(s):587 - 592