

# 연료전지 응용을 위한 고효율 3상 ZVZCS DC-DC 컨버터

김형준, 윤창우, 최세완  
서울산업대학교

## A High Efficiency Three-Phase ZVZCS DC-DC Converter for Fuel Cell Applications

Hyungjoon Kim, Changwoo Yoon, Sewan Choi  
Seoul National University of Technology

### ABSTRACT

본 논문에서는 수 kW급 이상의 연료전지 응용을 위한 고효율 전압원 3상 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 전압원 컨버터임에도 작은 턴비(기존 풀브리지의 1/2 이하)를 가지며 입출력 전류 리플이 작다. 또한 클램프 회로의 동작으로 다이오드 서지전압 제거는 물론 저전압측 순환전류를 큰 폭으로 감소시켜 스위치의 도통손실과 변압기의 동손을 최소화하였고 전 부하영역에서 하측 스위치의 ZVZCS를 성취하여 스위칭 손실을 최소화 하였다. 또한 유효 듀티를 증가시켜 누설 인덕턴스에 의한 듀티 손실을 보상하였다. 본 논문에서는 제안하는 컨버터의 동작원리를 서술하고 1.5kW Prototype을 제작하여 실험을 통해 본 방식의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서론

연료전지 응용에는 절연형 승압 DC-DC 컨버터로서 푸쉬풀 또는 풀브리지가 주로 사용되고 있으나 전력이 커지면 소자들이 큰 전류 스트레스를 갖게 된다. 따라서 5kW 이상의 높은 전력의 응용에서는 전류가 분배되어 소자 선정이 용이하고 입출력 유효주파수가 커서 필터의 사이즈가 작게 되며 변압기 부피를 줄일 수 있는 장점을 갖는 3상 DC-DC 컨버터가 유리하다<sup>[4]</sup>.

이제까지 제안된 3상 DC-DC 컨버터는 DAB(Dual Active Bridge) 방식<sup>[3]</sup>, 전류원 방식<sup>[4-5]</sup> 및 전압원 방식<sup>[6]</sup>이 있다. DAB 방식은 스위치 개수가 많고 입출력 리플이 크며 변압기의 kVA 정격이 매우 큰 단점이 있어 연료전지응용과 같이 입력전압 변동이 큰 응용에서는 적합하지 않다. 전류원 방식은 일반적으로 작은 변압기 턴 비와 작은 입력전류 리플, 작은 스위칭 전류정격, 작은 다이오드 전압정격 등의 장점을 갖지만 스위칭 전압 정격(즉  $R_{ds(on)}$ ) 이 커서 1차측 도통손실이 커지고 별도의 스타트업 회로와 클램프회로를 사용하므로 부피 및 손실 부담이 큰 단점이 있다.

반면에 전압원 방식은 스위칭 전압 정격이 낮아 작은  $R_{ds(on)}$  을 갖는 MOSFET로 대전류 측의 도통손실을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 전압원 컨버터는 스타트업 문제가 발생하지 않아 추가 회로가 필요치 않다. 그러나 전압원 방식은 치명적인 단점으로서 요구되는 변압기 턴 비가 너무 커 고효율을 달성하기 어려운 문제가 있다. 최근, 3상 전압원 컨버터로서 V6

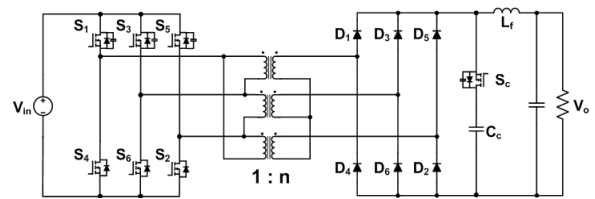


그림 1 제안하는 3상 컨버터  
Fig. 1 Proposed three-phase converter

컨버터<sup>[8]</sup>가 제안되었는데 변압기의 턴 비를 약간(기존 풀브리지의 1/1.2) 줄였다. 하지만 스위치 수가 많고 다이오드의 전압서지를 막기 위해 추가적인 클램프가 필요하다.

본 논문에서는 수 kW급 이상의 연료전지응용에 적합한 승압용 컨버터로서 아래와 같은 장점을 갖는 고효율 3상 전압원 컨버터를 제안한다.

- 변압기 턴비가 기존 전압원 풀브리지의 1/2 이하(기존 V6 컨버터의 2/3) 로 제작이 용이하다.
- 대전류의 순환전류를 리셋시켜 스위치 도통손실 및 변압기 동손을 최소화하였다.
- 넓은 부하영역에서 모든 스위치의 ZVZCS를 성취하여 스위칭손실을 최소화하였다.
- 유효듀티를 증가시켜 변압기 누설인덕턴스로 인한 듀티손실을 보상하였다.

본 논문에서는 제안하는 컨버터의 동작원리 및 특징들을 설명하고 1.5kW Prototype을 제작하여 실험을 통해 본 방식의 타당성을 검증한다.

### 2. 제안하는 컨버터의 동작원리

제안하는 승압형 3상 DC-DC 컨버터는 그림 1에서 보듯이 1차측에 3-레그 스위치와 2차측에 3상 다이오드브리지, LC필터, 클램프 회로, 3상  $\Delta$ -Y 변압기등으로 구성된다. 3상 변압기는 Y-Y,  $\Delta$ - $\Delta$ , Y- $\Delta$ ,  $\Delta$ -Y 등의 형태가 있으나 본 승압 응용에서는 변압기 턴비, 스위칭 전류 정격 및 변압기 kVA정격이 가장 작은  $\Delta$ -Y 결선을 선정하였다. 3상 컨버터에서는 변압기의 3상 결선만으로도 풀브리지나 푸쉬풀 컨버터보다 높은 승압효과를 갖는다. 또한 Y-Y나  $\Delta$ - $\Delta$ 와는 달리  $\Delta$ -Y 결선은 대전류 측 전류를 하측 스위치 2개로 분담하여 흘릴 수 있어 표 1에서 보듯이  $\Delta$ -Y결선 변압기의

표 1 변압기 결선에 따른 소자정격 비교

Table 1 Component rating according to transformer connection

	Y-Y	△-△	△-Y	Y-△
kVA Rating	$0.384 \cdot V_{in}$	$0.408 \cdot V_{in}$	$0.333 \cdot V_{in}$	$0.333 \cdot V_{in}$
Switch Current Rating	$I_{o,n}$	$I_{o,n}$	$I_{o,n}$	$I_{o,n}$
Upper Rating	$Upper : 0.577 \cdot I_{o,n}$		$Upper : 0.577 \cdot I_{o,n}$	
Lower Rating	$Lower : 0.577 \cdot I_{o,n}$		$Lower : 0.4 \cdot I_{o,n}$	

kVA 정격은 Y-Y결선의 81.6%, △-△결선의 86.7% 로 작다. 따라서 승압 응용에서는 △-Y결선의 3상 구조가 가장적이라 할 수 있다.

그림 2에 제안한 컨버터의 동작원리를 나타내는 파형을 보여 준다. 연료전지와 같은 저전압 대전류 응용에서는 대전류측의 도통손실이 전체손실의 가장 큰 비중을 차지하는데 풀브리지 Phase-Shift PWM 컨버터는 에너지를 전달하지 않는 순환전류에 의한 도통손실이 큰 문제가 있다. 하지만 제안하는 컨버터는 그림 3의  $t_4 \sim t_5$  구간에 보듯이 클램프 스위치의 동작에 의해 대전류측 순환전류가 리셋되어 스위치 도통손실 및 변압기 kVA 정격이 크게 감소된다. 또한 풀브리지 컨버터에서는 넓은 ZVS 영역을 위해서 큰 누설인덕턴스가 필요하지만 제안하는 컨버터는 부하크기나 누설인덕턴스 증가없이 모든 스위치(상측 스위치에서 ZVS턴온 & ZCS턴오프, 하측스위치에서 ZCS턴온 & ZVS턴오프)에서 넓은 ZVZCS 영역을 가진다.

기존의 ZVZCS 풀브리지 컨버터<sup>[2]</sup>에서 ZVZCS동작을 위한 데드타임으로 듀티가 제한되어 도통손실이 증가되는 문제가 있으므로 ZVZCS를 넓은 영역에서 성취하기 어렵다. 그러나 제안하는 컨버터의 하측스위치의 데드타임은 다음과 같다.

$$t_{dead,L} \geq (2C_{oss} + C_1) \frac{V_{in}}{nI_{o,ZVS}} \quad (1)$$

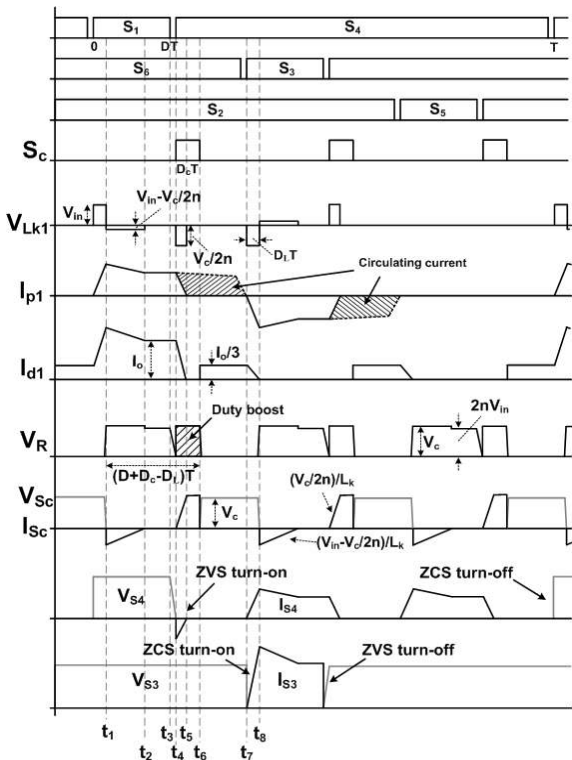


그림 2 제안하는 컨버터 동작 주요 파형  
Fig. 2 Key waveforms of the proposed converter

여기서  $I_{o,ZVS}$ 는 ZVS영역 내의 최소 부하전류이다. 따라서 제안하는 컨버터는 듀티제한이 없어 기존의 ZVZCS 풀브리지 컨버터에 비해 넓은 부하영역에서 하측스위치의 ZVS 턴오프가 가능하다.

제안하는 컨버터의 상측 스위치의 데드타임은 다음과 같다.

$$t_{dead,U} \geq L_k \cdot \frac{V_{in}}{(V_c/2n)} \quad (2)$$

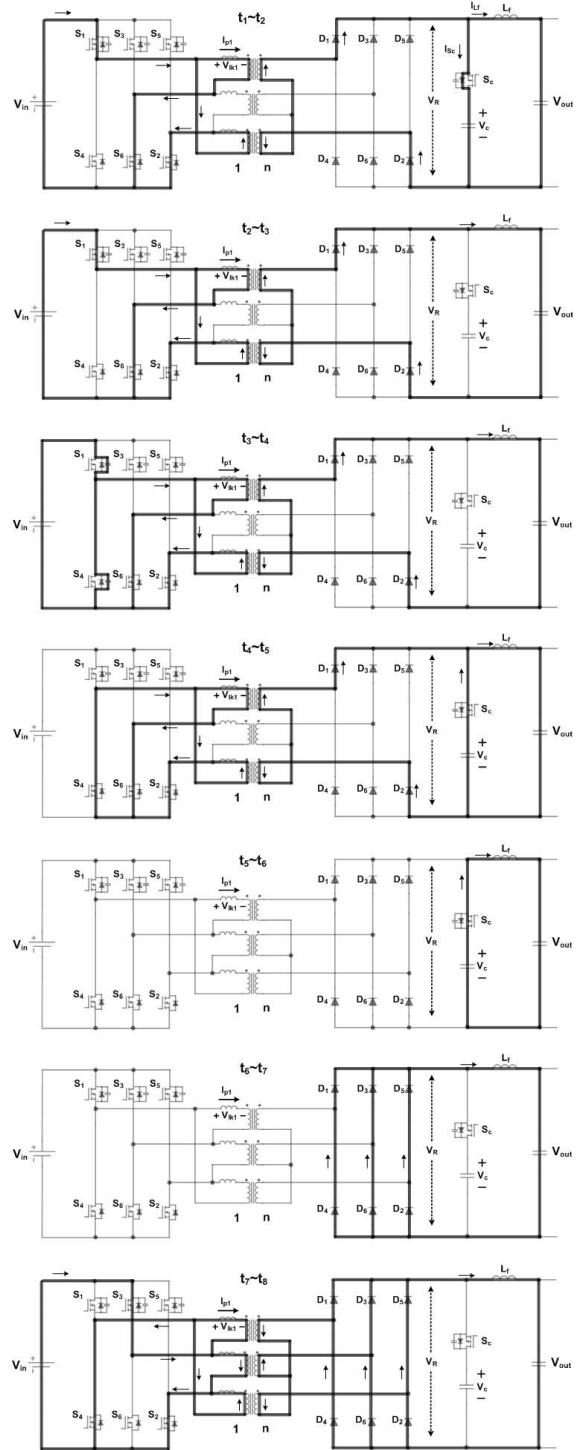


그림 3 제안하는 컨버터 동작모드  
Fig. 3 Operation states of the proposed converter

ZVZCS 풀브리지 컨버터의 ZCS 턴오프 범위는 lagging leg 스위치의 데드타임 때문에 제한되나 제안하는 컨버터는 상측스위치의 데드타임이 유효 듀티에 영향을 미치지 않기 때문에 전부하 범위에서 상측스위치의 ZCS 턴오프가 가능하다.

변압기 누설인덕턴스를 고려하지 않은 전압전달비는 다음과 같다.

$$\frac{V_o}{V_i} = 6n(D + D_c) \quad (3)$$

여기서 D는 주스위치의 듀티이고 D<sub>c</sub>는 클램프 스위치의 듀티이다. 기존 전압원 컨버터는 높은 변압기 턴비 누설인덕턴스가 커서 듀티손실이 발생한다. 제안하는 컨버터는 클램프 스위치로 그림 2에서 보듯이 정류기 전압 V<sub>R</sub>을 유지시켜 듀티손실을 보상할 수 있다. 듀티손실 D<sub>L</sub>을 보정한 출력전압은 다음과 같다.

$$V_o = 3V_c(D + D_c - D_L) \quad (4)$$

### 3. 실험 결과

본 장에서는 제안하는 컨버터를 다음의 사양으로 설계·제작하여 실험한 후 특징 및 동작원리를 검증한다.

- Power = 1.5 kW • V<sub>in</sub> = 22~41 V • V<sub>out</sub> = 400 V
- ΔI<sub>in</sub> = 10% • ΔV<sub>out</sub> = 20% • f<sub>s</sub> = 50 kHz

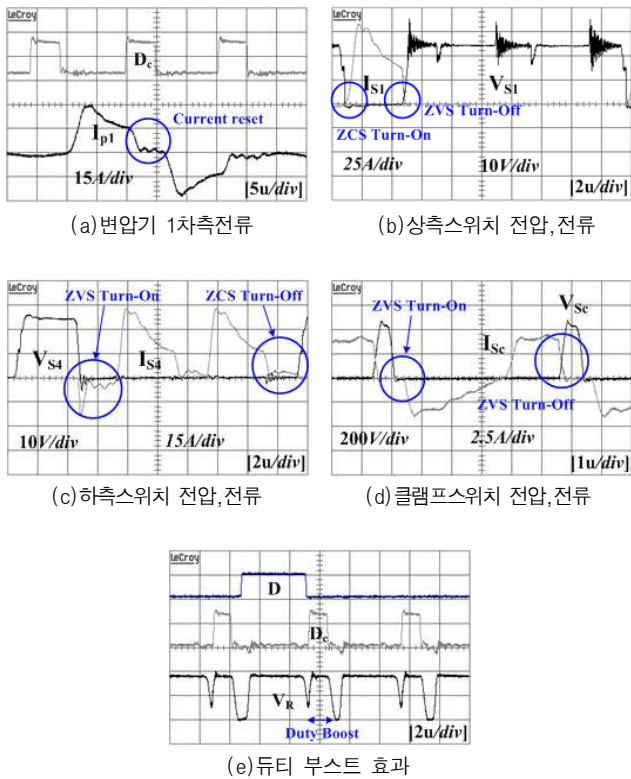


그림 4. 실험 파형  
Fig. 4 Experimental waveforms

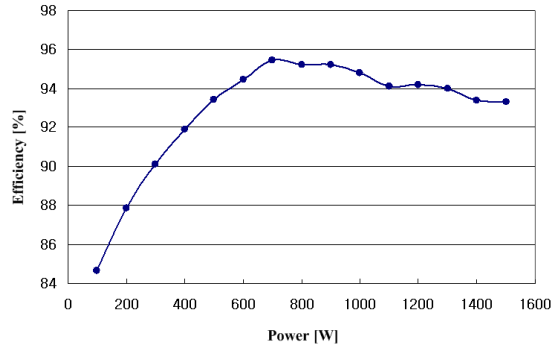


그림 5 측정 효율  
Fig. 5 Measured efficiency

제안한 컨버터의 변압기 전류 및 각부 스위치전압, 전류 파형을 그림 4에 나타내었다. 파형에서 볼 수 있듯 클램프 동작에 의해 변압기 1차측 전류 리셋과 각각 상·하측스위치 및 클램프 스위치의 ZVZCS 성취, 듀티승압 효과를 볼 수 있다. 이러한 효과에 의해 최대 실측효율은 700W 부하에서 95.7%를 달성하였다. 이와 같이 실험을 통해 실험파형과 이론적인 파형이 동일함을 증명하였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 수 kW급 이상의 연료전지 응용을 위한 고효율 전압원 3상 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 효율, 부피 측면에서 수 kW급 이상의 연료전지의 승압용 DC-DC 컨버터로 적합하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 제안하는 컨버터의 동작원리 및 특징을 설명하였고 1.5kW Prototype을 제작하여 실험을 통해 본 방식의 타당성을 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] 최세완, "특집 : 대체에너지 발전시스템에서의 전력전자기술 - 연료전지 발전시스템에서의 전력전자기술", *전력전자학회지*, 제6권, 제1호, pp.30-36, 2003년 8월.
- [2] Jung-Goo Cho, Chang-Yong Jeong, F.C Lee, "Zero voltage and zero current switching full bridge PWM converter using secondary active clamp," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, pp. 601-607 July 1998.
- [3] 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.
- [4] S.V.G Oliveira, Ivo Barbi, "A three-phase step-up DC-DC converter with a three-phase high frequency transformer," in *Proc. IEEE ISIE*, vol. 2, pp. 571-576 June 20-23, 2005.
- [5] Hanju Cha, Prasad Enjeti, "A Novel Three-Phase High Power Current-Fed DC/DC Converter with Active Clamp for Fuel Cells," in *Proc. IEEE PESC*, pp.2485 - 2489, June 17-21, 2007.
- [6] Jih-Sheng Lai, "A high-performance V6 converter for fuel cell power conditioning system," in *Proc. IEEE VPPC*, pp.7, Sept. 2005.