

연료전지 응용을 위한 능동 클램프 방식의 전압원 3상 DC-DC 컨버터

김형준, 김정근, 윤창우, 최세완
서울산업대학교

A Three Phase Voltage-Fed DC-DC Converter with Active Clamping for Fuel Cell Applications

Hyungjoon Kim, Jeonggeun 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 턴비를 가지며 입-출력 전류 리플이 작다. 또한 클램프 회로의 동작으로 다이오드 서지전압 제거는 물론 저전압측 순환전류를 큰폭으로 감소시켜 스위치의 도통손실과 변압기의 동손을 최소화하였고 전 부하영역에서 하측 스위치의 ZVZCS를 성취하여 스위칭 손실을 최소화 하였다. 또한 유효 듀티를 증가시켜 누설인덕턴스에 의한 듀티 손실을 보상하였다. 제안하는 컨버터의 동작원리를 설명하였고 기존 컨버터와의 비교분석을 수행하였으며 시뮬레이션을 통해 본 방식의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

연료전지는 일반적으로 출력전압이 낮고 부하에 따라 변동폭이 크기 때문에 이를 승압시키고 조정해야 하며 연료전지와 부하사이에는 안전과 노이즈의 차단 등을 위하여 절연이 필요하다^[1]. 이같은 연료전지 응용을 위한 절연형 DC-DC 컨버터는 전압원(Voltage-fed) 컨버터와 전류원(Current-fed) 컨버터로 분류된다.

전류원 컨버터는 절연형 부스트 컨버터로서 듀티비와 변압기의 턴비로 승압을 하므로 변압기의 턴비가 작다. 또한 앞단에 인덕터가 있어 연료전지로 유입되는 전류 리플 및 스위칭 전류 최대치가 작으며 2차측 정류 다이오드의 전압이 출력전압으로 고정되는 장점이 있어 연료전지의 승압용 컨버터로 많이 사용되어져 왔다^[5-7,13-14]. 그러나 전류원 컨버터는 스위치의 전압 정격이 높으며 변압기의 누설인덕턴스로 인해 스위치에 큰 전압서지가 유발되므로 추가적인 클램프 회로가 필요하며 초기 구동 시 스타트업을 위한 별도의 회로가 필요한 단점이 있다. 이에 반해 전압원 컨버터는 절연형 벡 컨버터이며 스위칭전압정격은 입력전압으로 고정되므로 작은 $R_{ds(on)}$ 을 갖는 MOSFET의 선정이 가능해지는데 1차측에 대전류가 흘러 전체 손실의 50%가 넘는 큰 도통손실을 갖는 응용에서는 이같은 특성이 효율측면에서 매우 유리하다고 할 수 있다. 또한 전류원 타입과 같이 스타트업 문제가 없고 제어도 비교적 간단하여 전압원 컨버터 또한 연료전지 응용에 많이 사용되어 왔다^[2-3,15]. 하지만 전압원 컨버터는 입력 측에 별도의 전류리플 필터가 필

요하며 매우 큰 변압기의 턴비로 인하여 누설인덕턴스가 커져 듀티 손실 및 스위치의 전류정격이 크고 다이오드의 역전압 회복특성과 링잉 현상에 의해 다이오드 전압정격이 매우 커지는 단점이 있다.

이와 같이 전압원 컨버터와 전류원 컨버터의 장단점은 상호 보완적이므로 주어진 연료전지의 전압변동범위 및 용량의 사양에 적합한 토폴로지를 선택하여야 한다. 또한 전압원과 전류원의 선택이외에도 풀브리지, 하프브리지 및 푸시풀등의 토폴로지의 선택이 필요하며 용량이 커지면 복수대를 컨버터를 병렬^[2] 연결하거나 다상의 컨버터^[3]가 유리해 진다.

예를 들어 미국 에너지부 SECA(Solid-state Energy Conversion Alliance)의 가정용 5kW급 SOFC 연료전지 발전 시스템의 목표사양은 입력전압 범위가 22~41V 이고 직류링크 전압이 400V 이므로 정격 입력전류가 300A를 넘게 되어 토폴로지가 단상 풀브리지인 경우 여러 개의 스위치를 병렬로 연결하여 사용하는데 등가의 $R_{ds(on)}$ 은 작아지지만 기생성분과 MOSFET 출력 커패시턴스의 증가로 ZVS의 영역이 작아져 결국 효율 저하로 이어진다. 따라서 가정용 또는 상업용등 연료전지의 용량이 수 kW급 ~ 수십 kW급 이상의 응용에서는 컨버터를 병렬로 운전하거나 3상의 컨버터가 사용되어진다. 3상 컨버터는 스위칭의 전류부담을 줄일 수 있고 단상 컨버터에 비해 입-출력 유효주파수가 커서 필터의 사이즈가 작아지는 장점이 있다. 이제까지 제안된 3상 DC-DC 컨버터는 DAB(Dual Active Bridge) 방식^[11], 전류원 방식^[13-14] 및 전압원 방식^[15]이 있다. DAB 방식은 구성이 간단하고 모든 스위치에서 ZVS 동작이 가능한 장점이 있으나 스위치 개수가 많고 입-출력 리플이 크며 변압기의 kVA 정격이 매우 큰 단점이 있어 연료전지 응용과 같이 입력전압 변동이 큰 응용에서는 적합하지 않다. 승압형 3상 전류원 컨버터로는 입력측에 3개의 인덕터를 사용하여 입력전류 리플 및 스위치 개수를 최소화한 방식^[13]이 있는데 대전류측에 3개의 인덕터와 수동 클램프회로를 사용하므로 부피 및 손실 부담이 큰 단점이 있다. 또한 입력측에 1개의 인덕터와 1개의 능동클램프를 사용하여 영전압 스위칭 및 서지전압 클램핑을 동시에 수행한 방식^[14]이 있는데 대전류측 클램프회로에 큰 전류가 흘러 클램프커패시터의 용량이 매우 큰 문제가 있다. 또한 승압형 3상 전압원 컨버터로서 V6 컨버터^[15]가 제안되었는데 3상의 고주파변압기를 Δ -Y 결선하여 턴비를 반으로 줄여 전압원의 단점인 높은 턴비의 문제를 해결하였다. 하지만 스위치의 수가 많고 다이오드에 서지전압을 막기 위해 클램프가 필요하므로 이에 따른 손실이 발생한다.

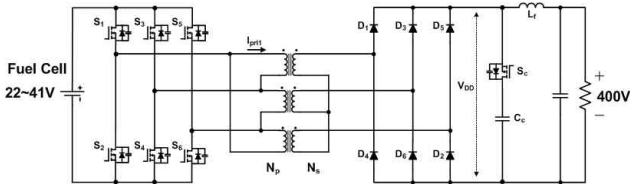


그림 1 제안하는 3상 컨버터

본 논문에서는 수 kW급 이상의 연료전지응용에 적합한 승압용 컨버터로서 2차측에 능동 클램프 회로를 갖는 고효율 3상 전압원 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 3상 변압기 Δ -Y 결선으로 턴비를 반으로 낮춰 전압원 컨버터의 결점을 보완하였고 능동클램프 동작으로 다이오드의 서지전압 제거는 물론 1차측 순환전류를 큰 폭으로 제거하여 스위치 도통손실 및 변압기 동손을 최소화하였으며 전 부하영역에서 하측 스위치 ZVZCS가 이루어진다. 또한 유효 듀티를 증가시켜 누설인덕턴스에 의한 듀티 손실을 보상이었다. 또한 단상 전압원 컨버터에서 나타나던 음의 입력전류를 제거하였으며 출력필터 크기도 감소하는 특징이 있다.

2. 제안하는 컨버터의 동작원리

제안하는 승압형 3상 DC-DC 컨버터는 그림 1에서 보듯이 1차 측에 6개의 MOSFET 스위치와 Δ -Y형으로 결선된 고주파 변압기, 2차 측에 3상 브리지 다이오드 정류기와 능동 클램프로 구성되어있다. 그림 2의 주요파형에서 보듯이 1차 측 각 레그는 서로 120° 의 위사차를 가지며 각 레그의

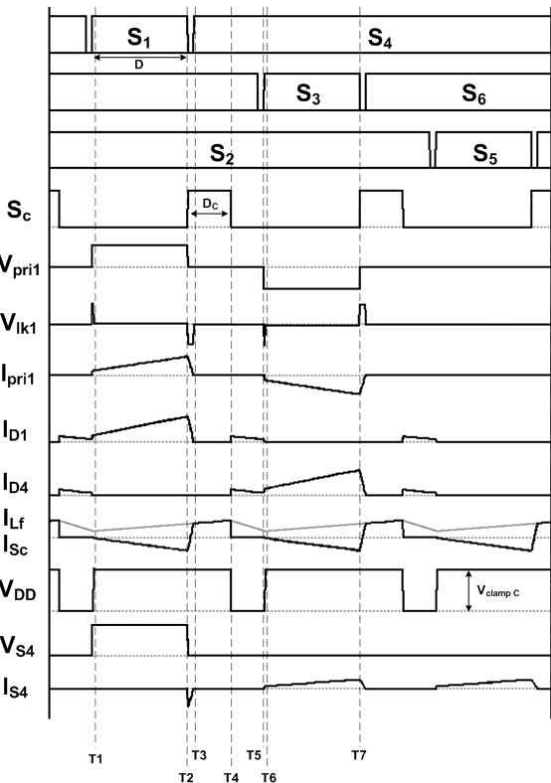


그림 2 제안하는 컨버터 동작 주요 파형

각 레그의 스위치는 비대칭으로 상보적(Complementary) 스위칭을 한다. 스위치가 턴오프 될 때 변압기의 누설인덕턴스의 에너지로 반대 쪽 스위치의 내부 다이오드를 도통시킨 후 채널의 ZVS 턴온 스위칭을 이루는 방식이다. 또한 2차측의 클램프 스위치는 상측 스위치에 동기시켜 발생하며 이로 인하여 순환전류 제거 및 하측 스위치의 ZCS 턴오프 스위칭이 이루어진다. 그림 3은 스위치 S4의 ZVS 턴온 스위칭이 되는 동작모드를 보여준다.

그림 4는 기존 전압원 3상 컨버터^[12]와 제안하는 컨버터의 변압기 전류, 하측 스위치 전압-전류 및 필터 인덕터 전압 파형을 나타낸다. 기존 전압원 3상 컨버터는 비대칭 PWM 방식으로 인해 넓은 순환전류 구간이 발생하는 비해 제안하는 컨버터는 클램프 동작에 의해 순환전류 구간이 제거되어 도통손실을

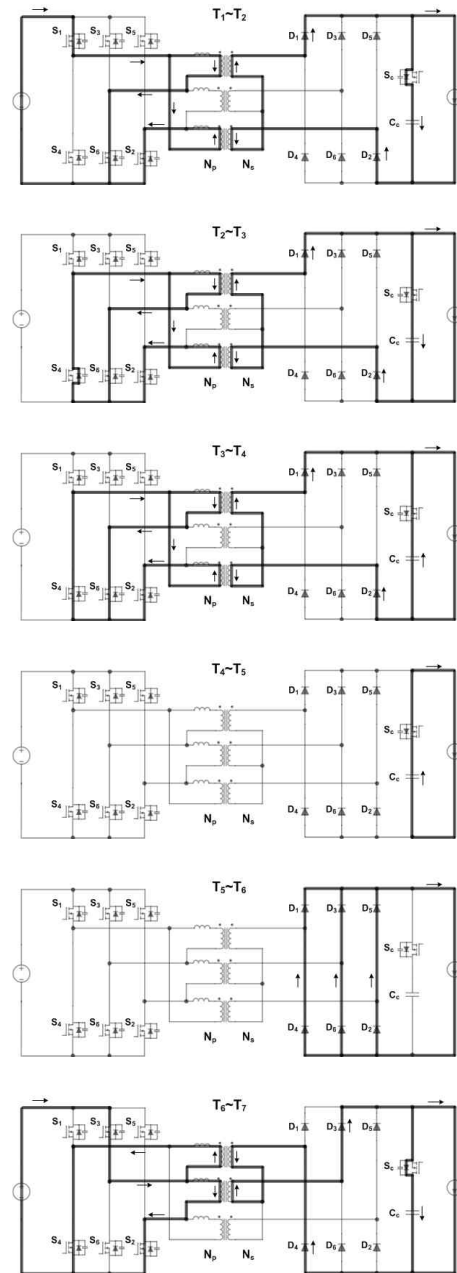
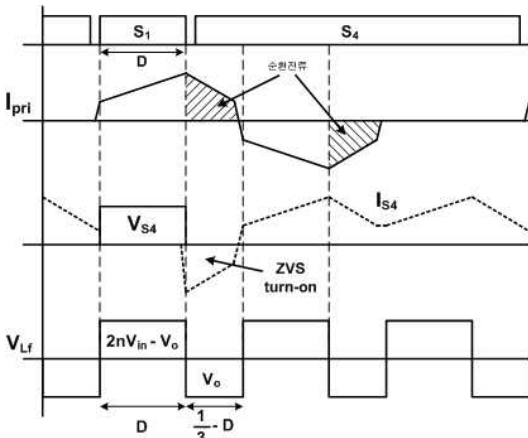


그림 3 제안하는 컨버터 동작모드

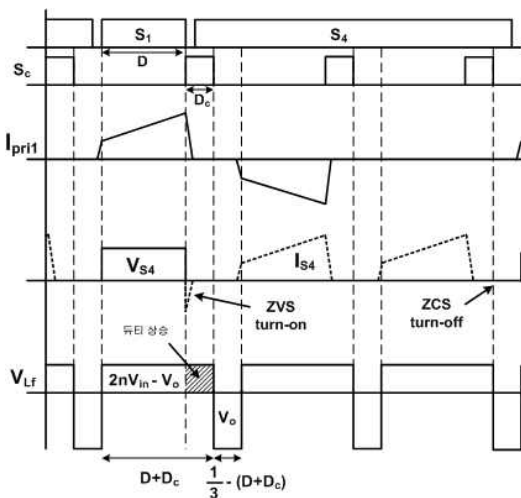
감소시키는 효과를 갖는 것을 알 수 있다. 또한 기존 전압원 3상 컨버터는 ZVS 턴온만 가능한 반면 제안하는 컨버터는 클램핑 동작으로 순환전류 구간 동안 변압기 1차측 전류가 리셋되기 때문에 전 부하영역에서 하측 스위치의 ZVZCS가 가능한 것을 볼 수 있다.

그리고 제안하는 컨버터는 그림 4(b)의 VLf에서 보듯이 클램프 스위치의 듀티가 추가되어 스위치의 유효 듀티가 증가하는 효과를 갖게 된다. 따라서 클램프 스위치의 듀티를 조절하여 누설인덕턴스에 의한 듀티손실을 보상할 수 있다. 유효 듀티가 포함된 제안한 방식의 전압전달비는 다음과 같다.

$$V_o = \left[3V_i(D + D_c) - (L_{lk} \cdot \frac{\Delta i_L}{dt}) \right] \cdot \frac{2N_s}{N_p} \quad (1)$$



(a) 기존 전압원 3상 컨버터^[12]



(b) 제안하는 컨버터

그림 4 변압기 전류 파형 및 필터 인덕터 전압파형 비교

표 1. 제안하는 컨버터 설계 예
($P_o : 5kW, V_i : 22V-41V, V_o : 400V, f_s : 50kHz$)

		소자 정격	실제 소자	
메인 스위치	V_{peak}	41 V	IRFB3206pbf (60V, 210A, 2.4mΩ)	
	I_{rms}	160 A		
다이오드	V_{peak}	600 V	IDP18E120G (1200V, 31A, $t_{rr}=195ns$)	
	I_{rms}	8 A		
클램프 스위치	V_{peak}	600 V	SGB15N120 (1200V, 30A, $V_{CE(sat)}=3.1V$)	
	I_{rms}	7 A		
클램프 커패시터	커패시턴스	10 uH	전해 1000V 10uF	
변압기	턴 비	1 : 10	48020-EC (MAGNETICS)	
	1차측	V_{rms}		15 V
		I_{rms}		115 A
	2차측	V_{rms}		152 V
		I_{rms}		11 A
kVA	1700 VA			
출력 필터	인덕턴스	120 uH	CM270125 (창성)	
	커패시턴스	0.1 uF	전해 600V 0.1uF	

표 1에 5kW급 연료전지 특성을 고려하여 설계한 제안하는 컨버터의 주요소자 정격을 나타내었으며 마진을 고려한 실제 소자의 선정 예를 보여준다. 스위치 전압 정격이 최대 입력전압 41V로 되므로 정격전압 60V, $R_{ds(on)}=2.4m\Omega$ 의 MOSFET의 선정이 가능하다. 또한 클램프 스위치의 전류정격과 클램프 커패시터의 용량이 작아 소자 선정이 용이하다. 변압기의 총 kVA 정격도 5.1kVA 로 매우 작은 것을 볼 수 있다. 또한 클램프 회로와 3상의 특성에 의해 출력 필터 크기가 매우 작아진 것을 볼 수 있다.

표 1에서 선정된 실제소자의 데이터 시트로부터 스위칭손실, 도통손실, 변압기 동손 및 철손, 커패시터 ESR 손실 등을 고려하여 계산한 후 제안하는 컨버터의 효율을 나타내었다. 정격 동작 지점인 입력 22V, 5kW 부하에서 96%의 효율을 갖는데 이는 대전류측의 순환전류가 제거되어 비중이 큰 도통손실이 감소되었기 때문이다. 경부하시에는 도통손실보다 스위칭손실의 비중이 커지기 때문에 효율이 약간 저하된다.

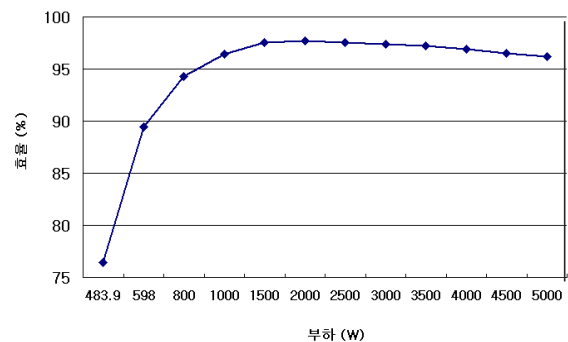


그림 5 제안하는 컨버터의 계산 효율

3. 시뮬레이션

제안한 컨버터의 하측 스위치의 전압, 전류 파형, 다이오드 전압, 전류 파형, 변압기 1차측 전류 파형, 연료전지 입력 전류 파형을 각각 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 하측 스위치에서 ZVZCS 동작이 이루어지는 것을 볼 수 있으며 그림 6(b)는 클램프 회로에 의해 다이오드 턴 오프 시 서지 전압이 제거되는 것을 볼 수 있다. 그림 6(c)는 클램프 회로에 의해 순환전류 구간이 제거되는 것을 볼 수 있으며 그림 6(d)는 클램프 회로에 의해 음의 입력전류를 제거되는 것을 볼 수 있다.



그림 6. 시뮬레이션 파형

4. 결 론

본 논문에서는 제안하는 3상 DC-DC 컨버터의 동작원리 와 계산에 의한 효율 분석을 수행하였으며 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 향후에 시험에 의한 검증을 하고자 한다. 본 논문에서 제안한 3상 컨버터는 전압원 방식의 최대 결점인 변압기의 높은 턴비 문제를 변압기의 Δ -Y 결선을 통한 승압으로 해결하였다. 또한 제안한 2차측 능동 클램핑은 다이오드의 서지전압을 제거하는 기본기능외에도 대전류측 순환전류에 의한 도통손실 저감, 전 부하영역에서 하측 스위치의 ZVZCS 및 클램프 스위치의 듀티조정에 의해 유효듀티를 상승시켜 누설인덕턴스로 인한 듀티손실을 보상하는 추가적인 효과를 갖는다. 그리고 저전류측에 클램프 커패시터를 위치시킴으로서 대전류측에 클램프를 적용하는 방식에 비해 클램프 커패시터의 부피와 수명의 문제를 유리하게 가져갈 수 있다. 따라서 제안한 컨버터는 효율, 부피 및 가격측면에서 수 kW급 이상의 연료전지의 승압용 DC-DC 컨버터로 적합하다고 할 수 있다. 향후에 시작품을 제작하여 실험에 의한 검증을 하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] 최세완, “특집 : 대체에너지 발전시스템에서의 전력전자기술 - 연료전지 발전시스템에서의 전력전자기술”, *전력전자학회지*, 제6권, 제1호, pp.30-36, 2003년 8월.

[2] J.Lee, J.Jo, M.Jang, S.Choi, S Han, "A 10kW SOFC Low Voltage Battery Hybrid Power Conditioning System for Residential Use", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol.21, Issue 2, pp.575-585, June 2006.

[3] J. Lai, M. Shenck, K. Stanton, Proceeding of Fuel Cell Seminar, 2004.

[4] A. Averbeg, A. Mertens, "Analysis of a Voltage-fed Full Bridge DC-DC Converter in Fuel Cell Systems," in *Proc. IEEE PESC*, pp. 286-292, June. 2007.

[5] G.K. Andersen, C. Klumpner, S.B. Kjaer, F. Blaabjerg, "A new green power inverter for fuel cells," in *Proc. IEEE PESC*, vol. 2, pp. 727-733, June. 2002.

[6] G. Ivensky, I. Elkin, S. Ben-Yaakov, "An isolated DC-DC converter using two zero current switched IGBTs in a symmetrical topology," in *Proc. IEEE PESC*, vol. 2, pp. 1218-1225, June. 1994.

[7] Peter J. Wolfs, "A Current-Sourced DC-DC Converter Derived via the Duality Principle from the Half-Bridge Converter," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 40, pp. 139-144, Feb. 1993.

[8] Akshay K. Rathore, Ashoka K.S. Bhat, Ramesh. Oruganti, "A Comparison of Soft-Switched DC-DC Converters for Fuel Cell to Utility Interface Application," in *Proc. IEEE PCC*, pp. 588-594, April. 2-5. 2007.

[9] M. Mohr, F.-W Fuchs, "Voltage Fed and Current Fed Full Bridge Converter for the Use in Three Phase Grid Connected Fuel Cell Systems," in *Proc. IEEE IPENC*. vol. 1, pp. 1-7, Aug. 2006.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Demercil S. Oliveira Jr. and Ivo Barbi, "A Three-Phase ZVS PWM DC/DC Converter with Asymmetrical Duty Cycle for High Power Applications" in *Proc. IEEE PESC*, vol. 2, pp. 616-621, 2003.

[13] 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.

[14] 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.

[15] Jih-Sheng Lai, "A high-performance V6 converter for fuel cell power conditioning system," in *Proc. IEEE VPPC*, pp.7, Sept. 2005.