

인터리브 방식 삼상 절연형 고효율 부스트 컨버터

최정완*, 차한주**
국기핵융합연구소*, 충남대학교**

Three-Phase Interleaved Isolated High Efficiency Boost Converter

Jungwan Choi*, Hanju Cha**
National Fusion Research Institute*, Chungnam National University**

Abstract - 본 논문에서는 새로운 형태의 삼상 절연형 부스트 컨버터를 제안한다. 이 컨버터는 삼상구조의 특성에 의하여 큰 전력을 취급할 수 있고 전류 연속모드 작동에 의한 실효 전류 값이 작아져 전체적인 도통손실이 줄어든다. 또한, 각 입력 부스트 인덕터의 인터리브 동작으로 입력전류 리플이 작아짐과 더불어 실효 동작주파수가 증가함에 따라 필터부품의 크기도 줄어든다. 이러한 장점들은 연료전지의 전력변환기로서의 적용에 적합하다. 각 부스트 컨버터의 출력은 삼상 변압기를 통하여 합쳐지고 이 변압기를 통하여 입출력간 절연과 승압이 이루어진다. 전체 효율은 평균 96 %이며, 이는 도통손실의 감소와 능동클램프의 적용에 의한 스위칭 손실 감소의 결과로 판단된다. 제안된 컨버터와 삼상 PWM 스위칭 방식을 구간별로 해석하였고 시뮬레이션 하였다. 또한, 500 W 급 하드웨어로 구현 및 실험을 통하여 설계를 검증하고 그 결과를 분석을 하였다.

1. 서 론

연료전지는 그 효율과 청정성으로 인하여 미래의 에너지원으로 인식되고 있다. 연료전지는 보통 26 ~ 42 VDC의 낮은 전압을 출력하며, 일반적으로 주택용 연료전지 시스템은 이와 같이 변동이 심하고 낮은 전압의 특징을 갖는 직류 전압원을 380 VDC 정도의 고전압으로 승압시켜 주는 DC/DC 컨버터와 승압된 DC 전력을 상용 AC 전원으로 연결해 주기 위한 인버터 시스템으로 구성되어 있다 [1]. 따라서 승압비가 높은 대전력 DC/DC 컨버터가 필요하며, 이러한 대전력 변환 및 양호한 전력 변환 품질을 얻기 위하여 삼상 DC/DC 컨버터의 적용을 위한 연구가 점차적으로 활성화되어 가고 있다. 그러나 이제까지의 삼상 DC/DC 컨버터 연구는 대부분 전압형이 주종을 이루고 있다 [2]-[5]. 최근 들어 삼상 전류형 컨버터가 연구되었으나 여러 가지 장점에도 불구하고 전류가 불연속 모드로 작동하는 단점이 있다 [6].

이 논문은 새로운 방식의 인터리브 방식 능동클램프 부 삼상 절연형 부스트 컨버터를 제안한다. 이 컨버터의 주요 특징으로는: DC/DC 컨버터에 삼상 전력회로를 적용하여 전력전달 정격의 증가, 입력 인덕터 회로의 인터리브 동작으로 연료전지 전류리플의 감소화, 전류 연속동작 모드에 의한 스위치, 변압기 및 인덕터에서의 도통손실 저감, 삼상 능동클램프의 적용에 의한 전압서지의 경감 및 스위칭 노이즈 감소, 입력 부스트 컨버터 구조의 적용으로 절연형 승압 변압기의 턴수 비 감소 등을 들 수 있다. 이러한 여러 가지 장점들로 인하여 제안하는 컨버터는 낮은 전압의 연료전지 출력과 높은 입력전압이 요구되는 상용전원용 인버터 사이의 전력 변환기로서 매우 적합할 뿐만 아니라 배터리와 태양전지와 같이 낮은 입력전압을 높은 출력전압으로 변환해 주는 대전력 DC/DC 변환기에도 확장 적용할 수 있다.

2. 본 론

2.1 제안하는 컨버터의 기본 구조

그림 1은 제안하는 인터리브 방식 능동클램프 부 삼상 절연형 부스트 컨버터 전력회로의 개념도를 보여준다. 이 컨버터는 그 출력이 Δ - Δ 결선된 절연형 삼상 고주파 변압기를 통하여 출력 폴브리지 정류기에 연결되는 삼상 DC/DC 컨버터로 구성되어 있다. 이 삼상 DC/DC 컨버터는 3 개의 MOSFET 주 스위치($S_1 \sim S_3$)와 3 개의 입력 부스트 인덕터($L_1 \sim L_3$)로 이루어진 부스트 컨버터부와 3 개의 MOSFET 보조 스위치($S_{C1} \sim S_{C3}$)와 공통 클램프 커패시터(C_c)로 이루어진 능동클램프부로 나눌 수 있다. 인터리브 PWM 동작은 삼상 컨버터 입력단에 있는 3 개의 부스트 인덕터 $L_1 \sim L_3$ 에서 일어나며 입력전류 I_i 의 리플전류 실효 주파수를 증가시킨 형태로 영향을 준다. 이와 같이 작은 크기의 필터소자를 적용하여 입력 리플전류 값의 크기를 줄인 효과를 내어 연료전지의 출력과의 연결에 적합하다. 능동클램프 회로는 MOSFET 스위치와 삼상

변압기의 부유용량 및 클램프 커패시터의 용량과 삼상 변압기의 누설 인덕턴스와의 공진작용에 의한 영전압 스위칭(ZVS) 작용으로 컨버터의 스위칭 손실을 경감해 준다. 이에 더하여, 능동클램프 회로가 스위칭에 인가되는 인덕터 서어지 전압을 클램프해 줌으로써 고주파 변압기 1 차측과 2 차측에 부가적인 스너버 회로가 필요 없게 된다. 적용된 삼상 구조는 각 부위에 흐르는 전류와 전압의 주파수를 3 배 증가시키는 효과를 주어 출력 필터소자의 크기를 줄여 주고, 전류가 삼상 경로로 분산되는 효과로 변압기 권선과 스위치에 흐르는 실효전류 값을 줄어들게 되어 같은 정격의 스위치로 더 큰 전력변환을 가능하게 해 준다. 또한, 이 컨버터에서는 입력전류 I_i 와 삼상 컨버터 출력전류 $I_a \sim I_c$ 가 연속모드로 동작하므로 매우 효율이 높게 동작한다.

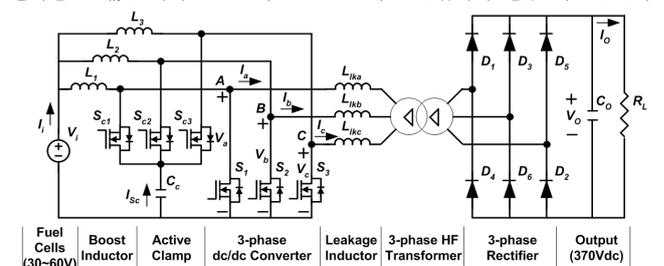
이러한 특징들로 인하여 제안하는 삼상 컨버터는 저전압 대전력 연료전지 전원과 인버터 사이의 전력변환기로서 매우 적합하며 낮은 직류 전압원으로 부터 다음 단계로 고전압 대전력을 전달해 주어야 하는 축전지 또는 태양전지용 전력변환기로서도 적합하다.

2.2 컨버터 동작

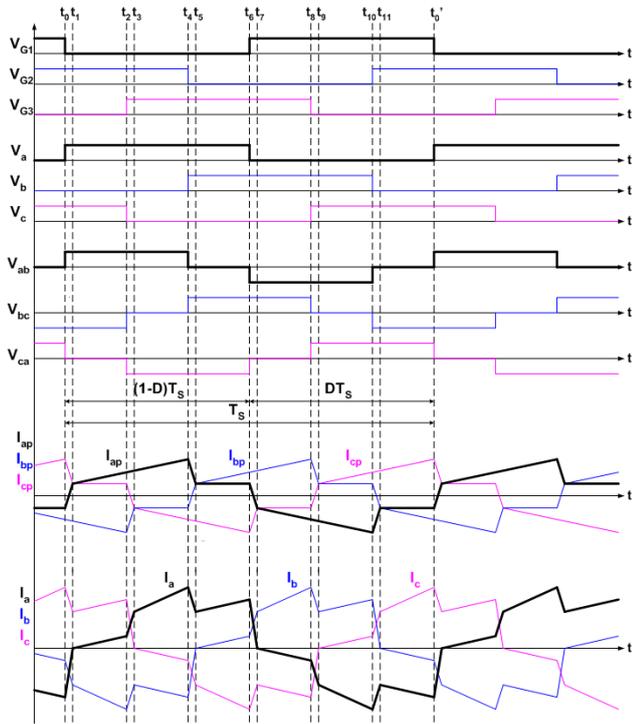
그림 2는 제안하는 컨버터의 스위치 구동파형과 각 부의 이상적인 전압 및 전류의 파형을 보여준다. 그림 2의 파형들은, C_c 및 C_o 의 용량이 충분히 커서 전압원으로 작동하고, $L_1 \sim L_3$ 도 역시 그 인덕턴스가 충분히 커서 전류원으로 작동한다는 가정 하에 작성되었다. 또한, 변압기의 누설 인덕턴스는 고려하였지만, 각 스위치, 변압기 및 출력 정류기의 부유용량 및 도통손실이 없다고 가정된 이상적인 파형이다. 그림 2에서 $I_{ap} \sim I_{cp}$ 는 Δ - Δ 변압기 결선에서 각 상의 권선전류 파형을, $I_a \sim I_c$ 는 컨버터 각 상의 출력전류 파형을 표시하고 있다. $V_{G1} \sim V_{G3}$ 는 주 스위치 $S_1 \sim S_3$ 의 게이트 구동 파형이고, $v_a \sim v_c$ 는 컨버터 출력 각 상의 상전압 파형이며, $v_{ab} \sim v_{ca}$ 는 컨버터 출력 각 상의 선간전압 파형을 보여준다. 제안하는 컨버터의 삼상 변압기 1 차측 상전류를 기준으로 한 동작 모드는 각 스위치의 게이트 구동 파형에 따라 그림 2와 같이 8 개 구간으로 나누어진다. 여기에서 DT_s 기간은 주 스위치가 턴 온 됨에 따라 입력 부스트 인덕터에 에너지가 축적되는 구간이며, 이 구간에서 부스트 인덕터에 축적된 에너지는 나머지 구간에서 스위치들의 온 오프작동 조합에 따라 변압기를 통하여 출력측으로 전달된다.

2.2 시뮬레이션 및 실험 결과

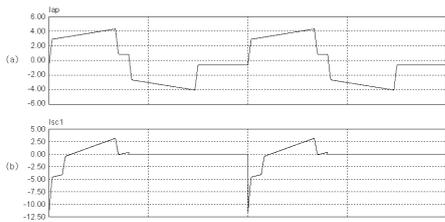
그림 3은 변압기 1 차측의 상전류 i_{ap} 와 클램프 전류 i_{Sc1} 의 시뮬레이션 파형을 보여준다. 이 시뮬레이션은 출력전력 $P_o = 500$ W, $V_i = 30$ V, $V_o = 370$ V에 대하여 수행되었고, 스위칭 주파수는 25 kHz, 부스트 인덕턴스 $L_1 \sim L_3$ 는 330 μ H, 삼상 변압기의 누설 인덕턴스 L_{lk} 와 자화 인덕턴스 L_m 은 각각 13 μ H와 2 mH 그리고 변압기의 턴수 비 n 은 5이



〈그림 1〉 인터리브 방식 능동클램프 부 삼상 절연형 부스트컨버터 전력회로



〈그림 2〉 제안하는 컨버터의 이상적인 주요 전압 및 전류 파형



〈그림 3〉 시뮬레이션 파형 (10 A/div), (a) 변압기 1 차측 상전류 i_{ap} , (b) 클램프 전류 i_{sc1}

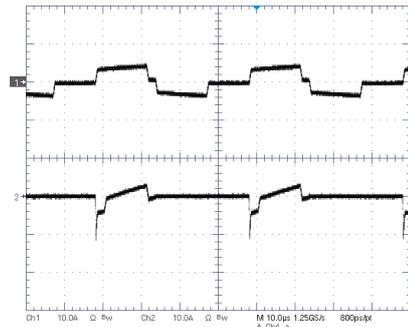
다. 이 시뮬레이션 파형은 변압기 및 컨버터의 한 상에 대하여 표시한 것이며 다른 두 상의 파형도 각각 120° 위상차가 있는 것을 제외하면 같은 모양을 갖는다.

제안하는 컨버터의 전력회로와 PWM 제어방식의 동작을 확인하기 위하여 500 W급 프로토타입 컨버터를 제작 및 실험하였다. 이 컨버터는 각 스위치의 게이트 구동 PWM 파형을 발생하기 위한 DSP (TMS320LF2407), FPGA (EMP7128), 게이트 구동회로, 3 조의 능동클램프 부와 주 스위치 회로, $\Delta-\Delta$ 결선된 삼상 일체형 변압기와 삼상 전파 브리지 정류회로로 구성되어 있다.

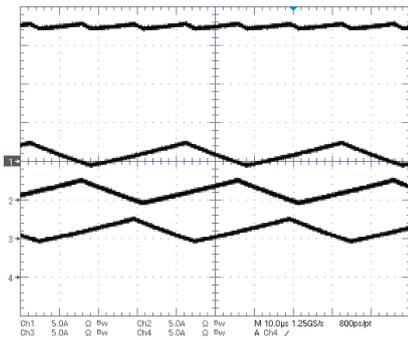
프로토타입 컨버터는 시뮬레이션에서와 같이 30 V의 입력 전압과 370 V의 출력 전압 그리고 500 W의 출력 전력, 즉, 출력 부하저항 $R_L = 274 \Omega$ 의 조건하에서 실험하였다. 실험에 적용된 듀티비 D 는 0.6이다. 그림 4는 이와 같은 조건으로 실험을 실시하여 얻은 결과 파형으로서 그림 3의 시뮬레이션 파형과 정확히 일치함을 확인할 수 있다. 그림 5는 입력 부스트 인덕터 각각에 흐르는 전류 $i_{L1} \sim i_{L3}$ 와 입력 인터리브 전류 i_i 를 보여주며, 각 인덕터에 흐르는 전류는 입력 전류로 인터리브되어 리플 전류의 크기가 줄고 주파수는 3 배가 되는 것을 확인할 수 있다. 입력 전압을 30 V, 부하저항을 274 Ω 로 고정하고 D 를 가변하여 출력전력이 100 W ~ 500 W가 되는 구간에서의 효율을 측정해 본 결과 이 컨버터 시제품은 평균 96 %의 높은 효율로 동작함을 확인하였다.

3. 결 론

이 논문은 삼상 PWM 방식의 새로운 DC/DC 컨버터를 제안하였다. 제안하는 컨버터는 입력단이 인터리브 방식의 삼상 부스트 컨버터로 구성되어 있기 때문에 연료전지의 출력 전력 변환에 적합하도록 리플 전류의 크기가 대폭 줄어든다. 인터리브 동작은 실효 동작 주파수를 증가시키기 때문에 필터 소자의 소형화를 실현할 수 있으며, 이에 더하여 제



〈그림 4〉 실험 결과 파형 (10 A/div), (a) 변압기 1 차측 상전류 i_{ap} , (b) 클램프 전류 i_{sc1}



〈그림 5〉 입력 인터리브 전류 파형 i_i (ch1) 및 삼상 입력 부스트 인덕터 전류 i_{L1} (ch2), i_{L2} (ch3), i_{L3} (ch4)

안하는 컨버터는 삼상 출력 전류가 연속 모드로 동작한다. 또한, 삼상 능동클램프 회로는 모든 스위치의 ZVS 스위칭 동작을 가능하게 하여 스위칭 손실을 줄여 줄 뿐만 아니라 전자기파 잡음신호의 발생을 저감시켜 준다. 이러한 장점으로 전체 컨버터 동작 효율은 96 %를 상회하는 결과를 보여주었다. 입력단에 부스트 컨버터를 적용함으로써 변압기의 턴수 비를 낮출 수 있으며, 이러한 장점들로 인하여 제안하는 컨버터는 연료전지 또는 태양전지와 같이 낮은 출력전압을 갖는 신재생에너지 전력변환기에 매우 적합할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] M.W. Ellis, M.R. Spakovsky, and D.J. Nelson, "Fuel cell systems: efficient, flexible energy conversion for the 21st century," Proceedings of the IEEE, vol. 89, pp. 1808 - 1818, Dec. 2001
- [2] A.R. Prasad, P.D. Ziogas, and S. Manias, "Analysis and design of a three-phase off line DC-DC converter with high-frequency isolation," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 28, pp. 824 - 832, July-Aug. 1992
- [3] D. de Souza Oliveira and I. Barbi, "A three-phase ZVS PWM DC/DC converter with asymmetrical duty cycle for high power applications," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, Issue 2, pp. 370 - 377, March 2005
- [4] J. Jacobs, A. Averberg, and R. De Doncker, "A novel three-phase dc/dc converter for high-power application," in Power Electronics Specialists Conference, 2004, pp. 1861 - 1867
- [5] C. Liu, A. Johnson, and J. Lai, "A novel three-phase high-power soft-switched DC/DC converter for low-voltage fuel cell applications," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, pp. 1691 - 1697, Nov.-Dec. 2005
- [6] H. Cha, and P. Enjeti, "A novel three-phase high power current-fed dc/dc converter with active clamp for fuel cells," in Power Electronics Specialists Conference, 2007, pp. 2485 - 2489