

연료전지용 3상 전류형 능동클램프 DC-DC 컨버터

차한주, 최정완
충남대학교, 핵융합연구센터

Three-phase Current-fed Active Clamped DC-DC converter for Fuel cells

Hanju Cha, Jungwan Choi
Chungnam National University, National Fusion Research Center

ABSTRACT

본 논문에서는 새로운 연료전지용 3상 전류형 능동 클램프 DC-DC 컨버터를 제안한다. 전류형 컨버터 구조에 능동 클램프 회로를 채용하여 과도기에 발생하는 서지전압을 저감하였고 모든 스위치에서 영전압 스위칭을 하며, 그 장점으로 : 연속적인 입력전류, 전압 오버슈트 제거, 영전압 턴 온 스위칭, 고주파 변압기 1차/2차 측에 부가적인 스너버 회로의 필요성 제거, 소프트 스위칭에 의한 저속 다이오드 적용 등이 있다. 더구나 대용량 발전 시스템에 적합하도록 전류형 컨버터 구조와 3상 전력변환 회로를 결합하였다. 3상 전력변환 적용의 장점은 : 입력전류 및 출력전압 주파수의 3배 증가, 스위치에 흐르는 RMS 전류 저감, 필터소자 용량 및 부피 감소, 고주파 변압기 이용률 증가, 전력회로의 단순화에 따른 전체 사이즈 축소 및 신뢰성 향상 등이 있다. 제안하는 3상 전류형 능동 클램프 DC-DC 컨버터는 이러한 장점들 때문에 발전용 연료전지 시스템의 승압형 DC-DC 컨버터에 적합하며 대용량 태양전지 발전 시스템 및 배터리 충전기 등에도 적용할 수 있다. 새로운 3상 DC-DC 컨버터와 함께 3상 PWM 알고리즘을 제안하며, 시뮬레이션과 프로토타입 제작, 실험을 통하여 그 성능을 평가, 확인한다.

1. 서론

현재 전력산업분야에서는 급격한 전력수요의 증가와 지구 온난화 문제를 해결하기 위해서 환경 친화형 발전방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 발전방식으로, 태양광, 풍력, 연료전지 발전 등이 있으며, 특히 연료전지 발전에서는 생성된 전력을 전력계통에 안정하게 주입하기 위한 DC-DC 및 DC-AC 전력변환 장치가 필수적이다.^[1] 고체고분자 연료전지(PEMFC)는 각 셀의 결합방법에 따라 보통 직류 20 ~ 36 V, 39 ~ 72 V 등의 출력전압을 낸다. 이러한 저전압 직류를 220 V, 60 Hz의 상용 교류전원으로 변환시키기 위해서는 우선 직류 380 V로 승압시키는 DC-DC 컨버터의 개발이 요구된다.^[2] 아울러 전류리플에 큰 영향을 받는 연료전지 특성 때문에 연속적인 전류흐름이 가능한 전류형 DC-DC 컨버터가 더 적합하다. 그러나 전류형 DC-DC 컨버터의 경우, 변압기의 기생 누설 인덕턴스에 기인된 서지전압(surge voltage)이 스위치에 손실 및 파괴를 유발할 수 있으므로 이에 대한 대책이 필요하다. 본 논문에서는 서지전압 저감용으로 능동 클램프 회로를 도입하여 전력회로를 간소화하고 주 스위치와 보조 스위치의 턴 온 시

영전압 스위칭(Zero Voltage Switching)이 가능하게 하였다. 또한 연료전지용 발전시스템에 적용되는 DC-DC 컨버터는 높은 효율, 간단한 구조, 높은 전력밀도를 가져야 한다.

제안한 승압형 DC-DC 컨버터는 DC-AC 변환부, 3상 고주파 변압기, AC-DC 변환부로 이루어져있다. DC-AC 변환부는 6개의 MOSFET(Metal Oxide Field Effect Transistor)을 사용하는 일반적인 3상 인버터 구조의 주 스위치와 1개의 능동클램프 MOSFET 보조 스위치와 1개의 클램프 커패시터, 전류원으로 동작하는 고주파 직류 인덕터로 구성되어 있다. 주 스위치와 보조 스위치는 고주파 변압기의 누설 인덕턴스와 클램프 커패시터 및 스위치의 출력 커패시터와의 공진을 이용하여 영전압 스위칭을 하므로 스위칭 손실을 줄일 수 있다.

본 논문에서 제안하는 3상 전류형 능동클램프 DC-DC 컨버터는 3상 전력변환방식, 능동클램프회로 채용, 3상 고주파변압기, 3상 PWM 알고리즘 등의 방법을 통하여, 가격, 전체 사이즈, 신뢰성의 문제를 해결할 수 있다.

2. 제안한 3상 DC-DC 컨버터

2.1 기존 대용량 DC-DC 컨버터

그림 1은 단상 전류형 능동클램프 DC-DC 컨버터를 보여주며 이 방식의 장점은 다음과 같다.^{[3][4]}

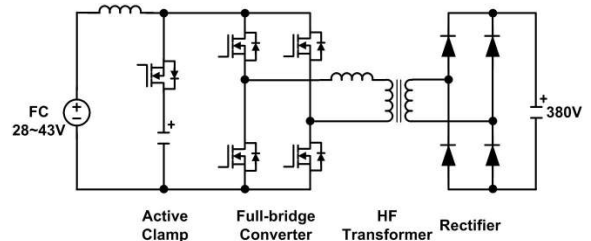


그림 1. 단상 전류형 능동 클램프 DC-DC 컨버터

- DC-DC 컨버터의 모든 스위치들은 영전압 동작을 한다.
- 턴 온, 오프 시, 스위치와 고주파 변압기에 오버슈트나 링잉이 발생하지 않는다.
- 추가적인 스너버 회로가 필요 없다.
- 전류형 구조이므로 고주파 변압기의 권수비가 낮아진다.
- 구성이 간단하여 전체적인 효율 및 안전성이 향상된다.

그림 2는 한국전력연구원에서 연구개발 중인 100 kW 급 용융탄산염(MCFC) 연료전지 시스템에 적용된 DC-DC 컨버터 구조이다. 이 시스템은 10 kW급 단상 풀브리지 전압형 DC-DC 컨버터를 그림 2와 같이 3대 직렬 연결한 컨버터모듈을 다시 4조 병렬 연결한 구조를 갖는다.^[5]

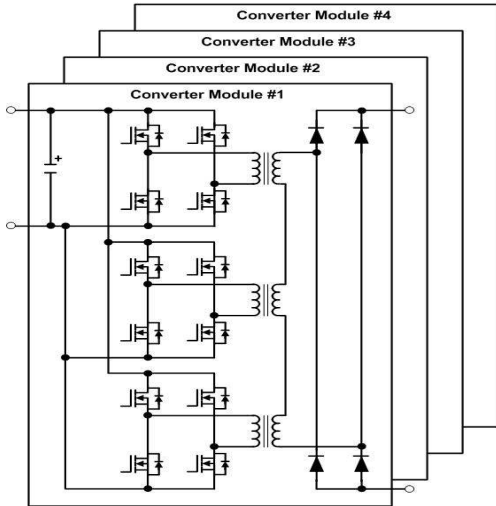


그림 2. 100 KW 급 용융탄산염 (MCFC) 연료전지 시스템에 적용된 DC-DC 컨버터부

이와 같이 발전용으로 개발되는 대용량 연료전지 시스템의 경우에 단상 DC-DC 컨버터구조의 채용은 요구되는 전체 전력 용량을 만족시키기 위한 단위 컨버터간의 매우 복잡한 연결구조와 각 단위 컨버터간의 동기 제어, 동기 보호, 순환전류 발생 문제 등을 야기하여 전체적인 시스템의 신뢰성을 저하시킨다.

그에 반해 대용량 AC 전력 변환분야에서 널리 사용되는 3상 시스템을 DC-DC 변환분야에 적용시키면 ^{[6][7][8]}

- 입력 전류와 출력 전류 주파수 증가 (약 3배)
- 컨버터 주 스위치에 흐르는 RMS 전류의 감소
- 리플 주파수의 증가로 변압기 및 필터부품의 크기 축소
- 변압기 코어 와 결선용 구리의 이용률 증가

등의 장점이 있으나,

- 제어회로 및 PWM 패턴 발생부가 복잡
- DC-DC 변환 3상 고주파 변압기 개발
- 3상 전력변환회로에 적합한 PWM 알고리즘 개발
- 늘어난 스위치 개수로 인해 발생하는 손실 저감을 위한 영전압, 영전류 스위칭 방법 채용

등의 문제를 해결하여야 한다.

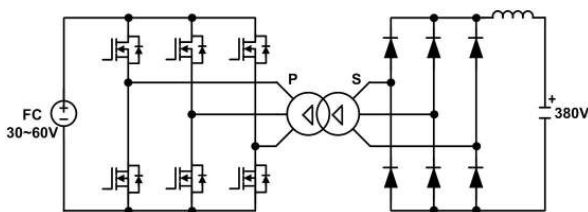


그림 3. 전압형 3상 DC/DC 컨버터 (I)

다음은 지금까지 발표된 대용량 3상 DC-DC 컨버터를 소개 하며, 모두 전압형 변환방식을 채용하였다. 그림 3은 3상 고주파 변압기의 누설 인덕턴스와 스위칭 소자의 기생 출력 커패시턴스를 이용하여 소프트 스위칭을 하였으며, 비대칭 듀티 사이클(asymmetrical duty cycle) PWM 알고리즘을 사용하였다.^[8]

그림 4는 3개의 단상 변압기를 2차 측에서 Y 결선으로 연결하여 변압기의 등가 턴 비를 2배 증가시켰으며, 1차 측 권선들은 각각의 단상 풀브리지 DC-DC 컨버터에서 흔히 사용되는 위상천이변조(Phase-shift modulation) 방식을 적용하여 넓은 부하범위에 걸쳐서 영전압, 영전류 스위칭을 실현하였다.^[9]

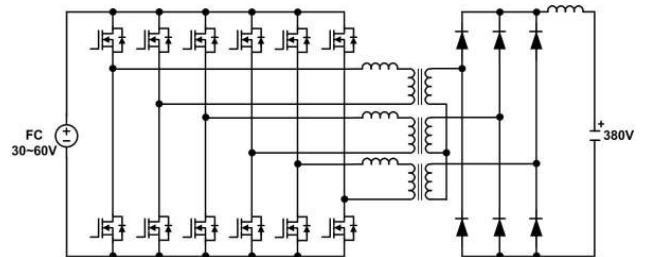


그림 4. 전압형 3상 DC/DC 컨버터 (II)

2.2 제안한 3상 DC-DC 컨버터 구조

본 논문에서 제안하는 DC-DC 컨버터는 DC-AC 변환부, 3상 고주파 변압기, AC-DC 변환부로 이루어져있다. DC-AC 변환부는 3상 DC-AC 인버터 전력회로에서 흔히 사용되는 3상 인버터 구조를 가지며, 6개의 MOSFET 주 스위치와 능동형 클램프회로를 구성하는 1개의 MOSFET 보조 스위치와 1개의 클램프 커패시터, 전류원으로 동작하는 고주파 직류 인덕터로 구성되어있다. 주 스위치와 보조 스위치는 고주파 변압기의 누설 인덕턴스와 클램프 커패시터 및 스위치의 출력 커패시턴스의 공진을 이용하여 영전압 스위칭을 하므로 스위칭 손실을 줄일 수 있으며, 그 구조를 그림 5에 나타내었다.

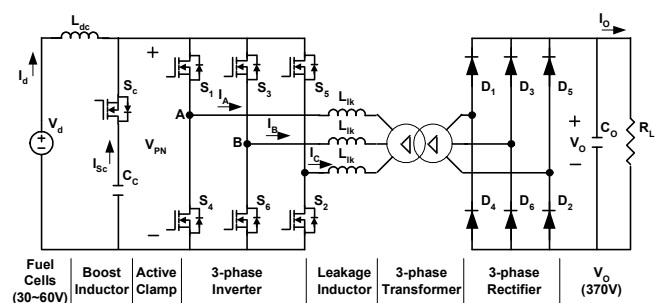


그림 5. 제안하는 전류형 3상 능동 클램프 DC/DC 컨버터

3. 실험 결과

제안한 3상 DC-DC 컨버터와 3상 PWM 알고리즘을 검증하기 위하여 그림 6에 나타난 바와 같이 500W 프로토타입이 제작되었다. 프로토타입은 3상 PWM 패턴을 계산하는 DSP 제어기, 계산된 PWM 패턴을 6개의 주스위치와 클램프 스위치에 영전압 스위칭을 고려하여 분배하는 FPGA (EPM7128), 게이

트 드라이버, 3조의 하프 브리지와 클램프 브리지가 장착된 4개의 히트 싱크, 3상 고주파 변압기로 이루어져 있다.

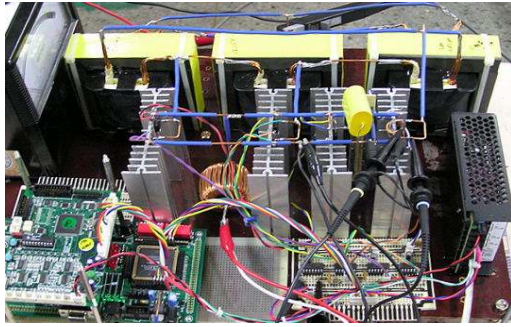


그림 6. 프로토타입 전류형 3상 능동 클램프 DC-DC 컨버터

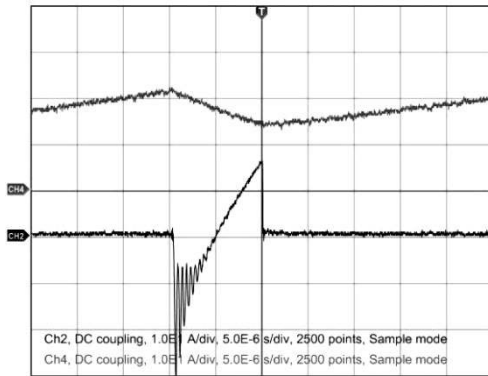


그림 7. 입력전류 및 클램프스위치 전류(4: I_d , 2: I_{S_c})

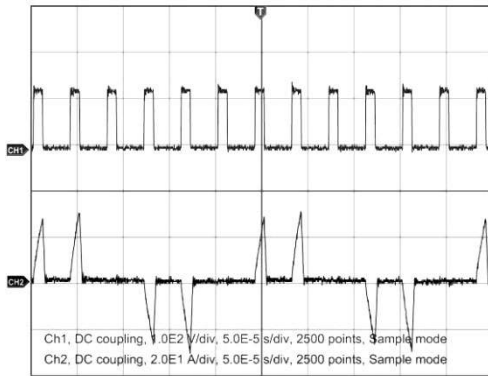


그림 8. 브리지 전압 (V_{PN}) 및 A상 출력전류 (I_A)

그림 7은 입력전류가 연속적으로 흐르고 있음과 클램프커패시터와 변압기 누설인덕턴스 사이의 공진경로인 클램프스위치의 전류파형을 보여주며, 그림 8은 각 스위치 게이트신호의 기준파형 및 3상 컨버터로부터 변압기로의 출력전류 파형을 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 새로운 연료전지용 3상 전류형 능동클램프 DC-DC 컨버터를 제안하였으며, 아울러 현재까지 발표된 대전

력용 DC-DC 컨버터를 소개하고 그 특징을 분석하였다. 제안한 3상 컨버터와 3상 PWM 알고리즘은 대용량 발전 시스템에 적합하도록 능동클램프 회로를 채용한 전류형 컨버터 구조의 장점과 3상 전력변환 방식의 장점을 결합하였다. 제안하는 3상 전류형 능동클램프 DC-DC 컨버터는 이러한 장점들 때문에 발전용 연료전지 시스템의 승압형 DC-DC 컨버터에 적합하며, 동일한 특성으로 인해, 대용량 태양전지 발전 시스템 및 배터리 충전기 등에 적용할 수 있다. 새로운 3상 DC-DC 컨버터와 함께 3상 PWM 알고리즘을 제안하였으며, 시뮬레이션과 프로토타입 제작, 실험을 통하여 그 성능을 평가, 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] "Fuel cell systems: efficient, flexible energy conversion for the 21st century", Ellis, M.W.; Von Spakovsky, M.R.; Nelson, D.J.; Proceedings of the IEEE Volume 89, Issue 12, Dec. 2001 age(s):1808 - 1818
- [2] "고체산화물형 연료전지를 위한 10kW급 독립전격변환장치의 개발", 이진희, 조진상, 장민수, 최세완, 한수빈, 전력전자학회논문지, 1229-2214, 제8권6호, pp.551-560, 2003
- [3] "Design, implementation, and experimental results of bi-directional full-bridge DC/DC converter with unified soft-switching scheme and soft-starting capability", Kunrong Wang; Lizhi Zhu; Dayu Qu; Odendaal, H.; Lai, J.; Lee, F.C.; Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual Volume 2, 18-23 June 2000 Page(s):1058 - 1063 Vol.2
- [4] "능동 클램프 전류형 하프 브리지 컨버터를 적용한 연료전지 발전시스템", 장수진, 김진태, 이태원, 이병국, 원충연, 전력전자학회논문지, 1229-2214, 제10권1호, pp.78-86, 2005
- [5] "100kW급 연료전지용 전력변환기 설계", 정홍주, 정준모, 권형남, 송중환, 임희천, 안교상, KIEE 하계학술대회논문집, 2003
- [6] "Analysis and design of a three-phase offline DC-DC converter with high-frequency isolation", Prasad, A.R.; Ziogas, P.D.; Manias, S.; Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 28, Issue 4, July-Aug. 1992 Page(s):824 - 832
- [7] "A three-phase ZVS PWM DC/DC converter with asymmetrical duty cycle for high power applications", de Souza Oliveira, D., Jr.; Barbi, I.; Power Electronics, IEEE Transactions on Volume 20, Issue 2, Mar 2005 Page(s):370 - 377
- [8] "A novel three-phase dc/dc converter for high-power application", Jacobs, J.; Averberg, A.; De Doncker, R.; Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual Volume 3, 20-25 June 2004 Page(s):1861 - 1867 Vol.3
- [9] "A novel three-phase high-power soft-switched DC/DC converter for low-voltage fuel cell applications", Changrong Liu; Johnson, A.; Jih-Sheng Lai; Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 41, Issue 6, Nov.-Dec. 2005 Page(s):1691 - 1697