

연료전지용 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터의 기동 방법 제안 및 제어기의 설계

차한주, 최순호
충남대학교 전기공학과

New Start-up Method and Controller Design for Three-Phase Current-fed DC/DC Converter with Active Clamp for Fuel Cells

Hanju Cha, Soonho Choi
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - 이 논문에서는 연료전지용 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터의 기동 방법을 제안하고, 정상 상태에서 컨버터의 출력 전압 및 입력 전류 제어를 설계하였다. 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터는 기동시 클램프 전압과 출력 전압의 차로 인해 스위치 및 변압기 권선에 큰 단락 전류가 흐르는 단점이 있다. 그러므로 기동시 입력 인덕터에 2차 권선을 감아 플라이백 방식을 이용하여 출력 전압을 확립시키는 방법을 제안하였다. 정상 상태에서 출력 전압 및 입력 전류 제어를 위해 두 개의 종속 연결 PI 제어기를 설계하였다. 전압 제어 이득의 시정수가 전류 제어 이득의 시정수보다 크게 함으로써 제어기의 안정도를 향상시켰다. 시뮬레이션을 통해 기동 방법을 확인하였다. 500W급 컨버터를 제작하였고, 실험을 통해 설계한 제어기의 성능을 확인하였다.

1. 서 론

최근 신재생에너지에 대한 관심이 증가하면서 태양광, 풍력, 연료전지 발전 기술 연구가 활발해지고 있다. 연료전지의 정격 출력 전압은 약 30~60V이므로 계통 연계를 위해서는 적어도 370V의 DC 전압이 필요하게 된다[1]. 따라서 연료 전지의 출력 전압을 승압하기 위해 DC/DC 컨버터가 필수적이다. 현재, 단상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터가 많이 이용되고 있으며[2-4], 또한 이러한 컨버터의 정격을 증가시키기 위해 3상 컨버터가 제안되어 왔다[5-9]. 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터의 경우, 구조적으로 과전류와 단락에 대한 보호 등의 장점이 있다. 하지만, 컨버터가 정상적으로 동작하기 위해서는 초기 출력 전압이 확립되어야 하며, 그 값은 2차 축으로 환산한 입력 전압보다 작으면 안 된다. 따라서 이 논문에서는 입력 인덕터에 부가적으로 2차 권선을 감아서 플라이백 방식으로 출력 전압을 확립하는 방법을 제안하였다[10]. 그리고 정상상태에서 출력 전압 및 입력 전류를 일정하게 제어하기 위한 종속 연결 PI 제어기를 설계하였다.

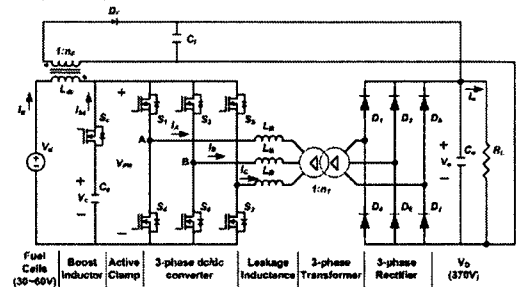
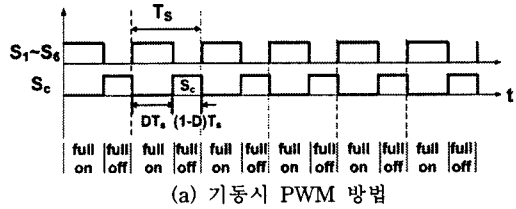
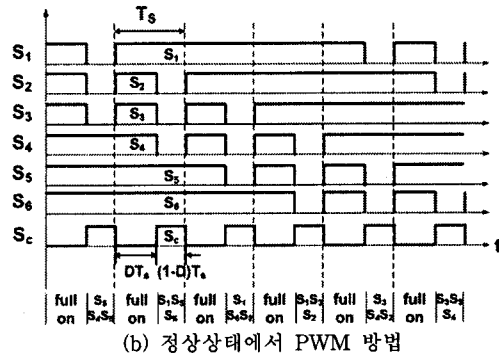


그림 1. 기동 권선을 가진 3상 능동 클램프 전류형 DC/DC 컨버터



(a) 기동시 PWM 방법



(b) 정상상태에서 PWM 방법

그림 2. 동작 상태에 따른 PWM 방법

2. 기동 방법의 제안

그림2(a)에 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터를 기동하기 위한 PWM방법을 나타내었다. 기동시 컨버터는 능동 클램프 플라이백 컨버터로 동작한다. 6개의 주 스위치가 켜지면 입력 인덕터에 전류가 흐르고, 에너지가 저장된다. 주 스위치가 모두 꺼지면서 클램프 스위치가 켜지면, 플라이백 방식을 통해 입력 인덕터의 2차 권선에 전류가 흐르고, 출력 축으로 에너지가 전달된다. 듀티와 출력 전압의 관계식은 다음과 같이 유도된다[10].

$$V_o = \frac{D}{1-D} n_F V_i \quad (1)$$

여기서 D는 듀티비, n_F 는 입력 인덕터와 플라이백 권선의 권선비이다.

주 스위치 $S_1 \sim S_6$ 에 가해지는 전압 스트레스는 클램프 전압과 같다.

$$V_c = \frac{1}{1-D} V_i \quad (2)$$

기동시 듀티가 0부터 증가하여 0.5가 되면 출력 전압은 다음과 같다.

$$V_o = n_F V_i \quad (3)$$

그림2(b)에 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터의 PWM 방법을 나타내었다. 기본 동작 방법은 다음과 같다. DT_S 구간에서 6개의 주 스위치가 모두 켜지면 입력 인덕터에 에너지가 저장된다. 그리고 $(1-D)T_S$ 구간에서 3개의 주 스위치가 켜지면 나머지 3개의 주 스위치를 통해, 3상 변압기와 3상 정류기를 거쳐 출력 측으로 에너지가 전달된다. 능동 클램프 회로는 주 스위치 오프 시 변압기의 누설 인덕턴스에 저장된 에너지에 의해 브리지 전압에 서지가 발생하는 것을 막아준다. 출력 전압은 다음과 같다.

$$V_o = \frac{1}{1-D} n_F V_i \quad (4)$$

부스트 컨버터 동작시 주 스위치 $S_1 \sim S_6$ 양단에 가해지는 전압 스트레스는 변압기의 1차 측으로 환산한 출력 전압과 같다.

$$V_c = \frac{1}{1-D} V_i \quad (5)$$

3. PI 제어기의 설계

컨버터의 제어 대상은 입력 전류 및 출력 전압이며, 그림3의 블록도와 같이 제어기를 설계하였다. 컨버터의 출력 전압이 피드백 루프를 통해 지령전압과 비교되며, PI 제어기를 통해 전류 지령을 만들어낸다. 전류 지령은 다시 입력 전류의 값과 비교되며, PI 제어기를 통해 스위치의 듀티비를 만들어낸다. PI 제어기에 사용된 이득 값을 표1에 나타내었다. 출력 전압의 변동에 따른 입력 전류의 적절한 추종을 위해 전압 PI 제어기의 시정수 τ 는 2msec 로 선정하였으며, 이것은 전류 PI 제어기의 시정수($\tau=400\mu\text{sec}$)보다 5배 큰 값이다.

표 1. PI 제어기에 사용된 제어 이득

	변수	이득	시정수(τ)
전압 비례 이득	$k_p_V_o$	0.2	2msec
전압 적분 이득	$k_i_V_o$	50	
전류 비례 이득	$k_p_I_{dc}$	0.02	400 μsec
전류 적분 이득	$k_i_I_{dc}$	50	

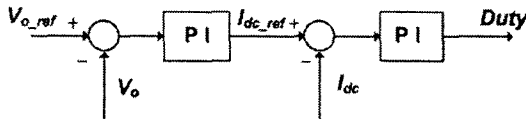


그림 3. PI 제어기 블록도

4. 시뮬레이션 결과

3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터의 기동 방법을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 기동시 초기 듀티는 0부터 0.5까지 20msec 동안 증가한다. 이 때 컨버터는 개루프로 제어되며, 입력 인덕터의 플라이백 전선을 통해 출력 측으로 전력이 전달된다. 출력 전압 V_o 가 어느

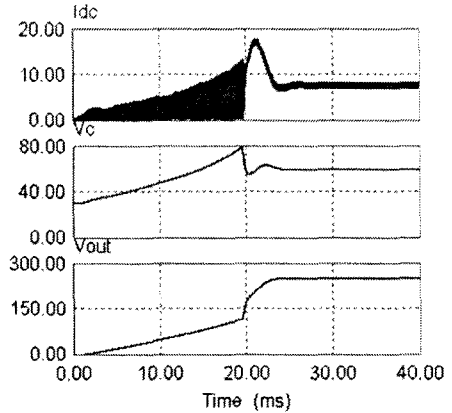


그림 4. 시뮬레이션을 통해 얻은 입력 전류 I_d , 클램프 전압 V_c , 출력 전압 V_o .

정도 확립되면 페루프 제어를 통해 컨버터는 정상 상태로 동작하며, 출력 전압 및 입력 전류를 일정하게 유지하게 된다.

5. 실험 결과

500W급 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터를 제작하였고 그림 5에 나타내었다. 설계한 보드는 디지털 신호 처리기 (DSP : TMS320F2808), EPM7128, 게이트 드라이버 부분, DC/DC 컨버터, 입력 전류 및 출력 전압 센서, 트립 발생 부분, A/D 컨버터 입력 부분으로 구성 되어 있다.

그림6에 브리지 전압 V_{PN} 과 변압기 1차측 선전류 I_A 를 나타내었다. 주 스위치 중 3개가 오프 되어 V_{PN} 이 V_c 와 같아지면, 변압기를 통해 연료전지로부터 부하로 에너지가 전달된다. 그림7에 입력 전류 및 브리지 전압

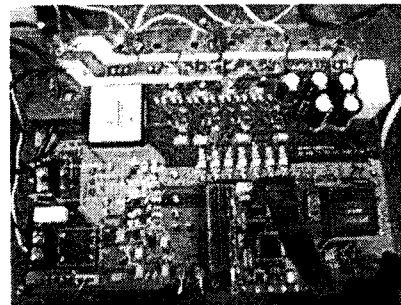


그림 5. 500W급 컨버터의 제작

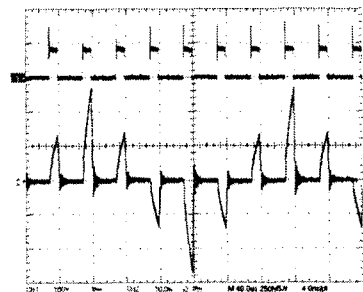


그림 6. 브리지 전압 V_{PN} 과 변압기 선전류 I_A

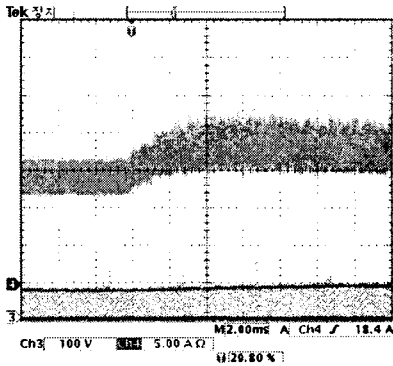


그림 7. 개루프 제어에서 폐루프 제어로의 전환 입력 전류 I_d 및 브리지 전압 V_{PN}

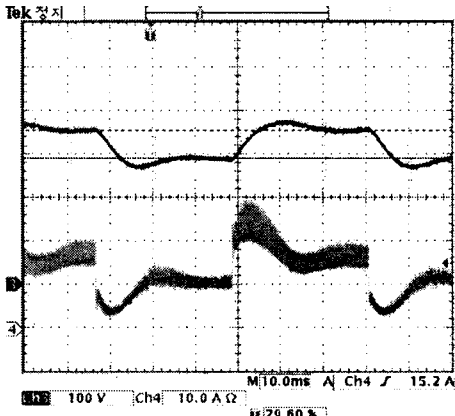


그림 8. 지령 전압 변동시 출력 전압 및 입력 전류의 추종 파형

을 나타내었다. 초기 구동 시 일정 듀티비로 운전하다가 제어기를 활성화 시키면, 출력 전압을 370V로 일정하게 유지시키기 위해 전류가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림8은 지령 전압의 변동에 따른 출력 전압 변동을 나타내었다. 지령 전압을 300V와 370V로 각각 설정하였으며, 32msec 간격으로 변화도록 설정하였다. 실제한 제어기에 의해 출력 전압 및 입력 전류가 잘 제어됨을 확인할 수 있다.

6. 결 론

이 논문에서는 연료전지용 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터의 초기 출력 전압 확립을 위해 기동 방법을 제안하였고, 정상상태에서 출력 전압과 입력 전류를 일정하게 유지하기 위한 제어기를 설계하였다. 전류형 컨버터의 경우 초기 출력 전압이 확립되지 않으면, 기동시 과전류로 인해 컨버터의 스위치 소자 및 변압기 권선 등에 손상을 입힐 수 있다. 따라서 입력 인덕터에 2차 권선을 감는 방식의 기동 방법을 제안하였고, 시뮬레이션을 통해, 동작을 확인하였다. 그리고 정상상태에서 컨버터의 출력 전압과 입력 전류를 일정하게 제어하기 위해 PI 제어기를 적용하였다. 컨버터는 출력 전압을 일정하게 제어해야할 뿐 아니라, 입력 전류의 변동에서도 적절한 제어가 이루어져야 하기 때문에 두 개의 PI 제어기를 중속 연결하였다. 500W급 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터를 제작하여 실험하였다. 지령 전압의 변동에 따라 출력 전압 및 입력 전류가 일정하게 유지되었고, 제어기의 성능을 확인하였다.

[1] M.W. Ellis, M.R. Von Spakovsky, D.J. Nelson, "Fuel cell systems: efficient, flexible energy conversion for the 21st century", Proceedings of the IEEE Volume 89, Issue 12, Dec. 2001 Page(s):1808 - 1818

[2] V. Yakushev, V. Meleshin, S. Fraidlin, "Full-bridge isolated current fed converter with active clamp", Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 1, pp. 560-566, 1999

[3] W.C.P. De Aragao Filho, I. Barbi, "A comparison between two current-fed push-pull DC-DC converters-analysis, design and experimentation", 18th International Telecommunications Energy Conference, 1996, 6-10 Oct. 1996 Page(s):313 - 320

[4] Kunrong Wang, Lizhi Zhu, Dayu Qu, H.Odenaal, J. Lai, F.C. Lee, "Design, implementation, and experimental results of bi-directional full-bridge DC/DC converter with unified soft-switching scheme and soft-starting capability", IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference, 2000. Volume 2, 18-23 June 2000 Page(s):1058 - 1063 vol.2

[5] Jr.de Souza Oliveira, I. Barbi, "A three-phase ZVS PWM DC/DC converter with asymmetrical duty cycle for high power applications", IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 20, Issue 2, Mar 2005 Page(s):370 - 377

[6] J.Jacobs, A. Averberg, R. De Doncker, "A novel three-phase dc/dc converter for high-power application", IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Volume 3, 20-25 June 2004 Page(s):1861 - 1867 Vol.3

[7] A.R. Prasad, P.D. Ziogas, S. Manias, "Analysis and design of a three-phase offline DC-DC converter with high-frequency isolation", IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 28, Issue 4, July-Aug. 1992 Page(s):824 - 832

[8] Changrong Liu, A. Johnson, Jih-Sheng Lai, "A novel three-phase high-power soft-switched DC/DC converter for low-voltage fuel cell applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 41, Issue 6, Nov.-Dec. 2005 Page(s):1691 - 1697

[9] Hanju Cha, Prasad Enjeti, "A novel three-phase high power current-fed DC/DC converter with active clamp for fuel cells", IEEE 38th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2007. Volume 3, 18-22 June 2007 Page(s):2485-2489

[10] Lizhi Zhu, Kunrong Wang, F.C. Lee, Jih-Sheng Lai, "New start-up schemes for isolated full-bridge boost converters", IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 18, Issue 4, July 2003 Page(s):946 - 951