

주기적인 펄스 부하에서 ZVS Full-Bridge 컨버터의 효율 증대를 위한 제어 방법과 출력 동특성 향상 분석

이동영, 김정원, 조보형
 서울대학교 전기공학부 전력전자 시스템 연구실

Efficient Control Method for ZVS Full-Bridge Converter with Periodic Pulsed-Load Output Dynamic Improvement

Dong-Young Lee, Jung-Won Kim, Bo-Hyung Cho
 Power Electronics System Laboratory School of Electrical Engineering Seoul National Univ

Abstract - An efficient control method of ZVS Full-bridge PWM converter with a periodic pulsed-load current is proposed. This novel control method can reduce the switching loss of switches during no load condition. Moreover, by using feed-forward load current information this method can obtain better transient dynamics compared to the system with only linear feedback control.

특히 그림 2에서 보듯이 ADS (Address Display Separated) 방식의 AC-PDP (Plasma Display Panel)의 부하와 같이 짧은 구간에서 많은 부하 전류를 사용하고 부하가 없는 구간이 상당히 긴 경우에 제안된 제어 방법이 매우 효율적이다. 게다가 부가적으로 부하 전류의 feed-forward 정보를 이용하므로 최적화된 설계를 통하여 feedback 선형 제어기보다 더 나은 전이 동특성을 얻을 수가 있다.

1. 서론

최근 들어 컨버터 시스템에서 효율을 높이고 컨버터의 크기를 줄이며 스위칭에 의한 EMI 노이즈를 줄이기 위해 soft-switching 기법을 이용한 회로를 많이 사용하고 있다. 특히 ZVS full-bridge PWM 컨버터는 제어가 간단하고 적은 소자로 구현 가능하므로 수 kW 이상의 전력에서 많이 사용된다. 그러나 ZVS full-bridge PWM 컨버터는 ZVS를 보장하기 위해서 부하 전류가 설계값 이상으로 흘러야만 된다. 즉 부하가 작거나 없을 시에는 ZVS가 실패하고 계속해서 모든 스위치가 스위칭 주파수로 스위칭을 하게 되므로 스위칭 손실에 의한 열 발생과 전체 효율이 나빠지게 된다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 새로운 ZVS full-bridge PWM 회로의 제어 방법을 제시한다. 기존의 phase shift control에 간단한 논리 회로를 추가하여 부하가 없을 시에 컨버터의 gating 신호를 차단하므로 컨버터의 효율을 증대시킬 수가 있다.

2. 제안된 제어 방법의 원리와 구현

제안된 제어기는 기존의 phase shift controller의 gating 신호 출력에 부하 전류와 출력 전압의 정보를 이용하여 gating을 차단할 수 있는 논리 회로로 구현되어 있다. 그림 3은 제안된 제어기의 구조이다. 논리 회로는 부하가 0이 되고 출력 전압이 일정한 수준 이상일 때 gating을 차단하는 논리 구조로 되어 있다. 출력 전압의 정보를 필요로 하는 이유는 컨버터가 동작하는 시점에는 부하 전류가 0이므로 전압이 일정한 수준까지 올라간 이후에 gating 차단 회로가 동작해야 한다. 그리고 부하가 0이 된 이후에도 컨버터 자체의 손실과 dummy 저항에 의해 전압이 떨어지는 현상을 막기 위해서이다.

그림 3에서 보듯이 센싱 저항에 의해 측정된 부하 전류의 전압 정보는 증폭기를 통하여 비교할 수 있는 전압 수준으로 증폭된다. 증폭된 신호는 비교기를 통해 부하 전류가 설계된 기준 전류보다 낮아지면 비교기의 출력이 high가 된다. 동시에 출력 전압이 설계된 기준 전압보다 높아지면 비교기의 출력이 high가 된다. 이때 기준 전류는 0에 가깝게 설계된다. 또 기준 전압은 출력 전압보다 작아야 되며 가깝게 설계된다.

2개의 비교기 출력이 최종적으로 NAND 논리회로에 입력으로 들어가서 전압이 일정 수준 이상이 되고 부하 전류가 0이 될 때만 NAND 출력이 low가 되어 스위치의 gating 신호가 차단되고 컨버터의 스위칭이 중단된다.

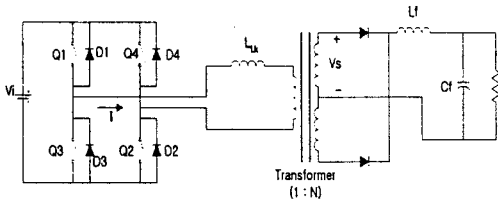


그림 1 ZVS Full-bridge PWM 컨버터

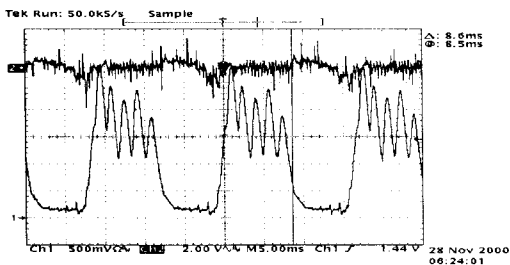


그림 2 ADS 방식의 AC-PDP 부하 전압과 전류 (1V/div, 2A/div, 5msec/div.)

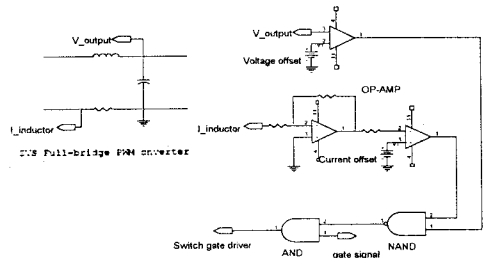


그림 3 제안된 제어 방법의 논리 회로

3. 시뮬레이션 및 동특성 분석

3.1 시뮬레이션 조건과 실험 하드웨어 설계값

제어기의 성능을 검증하기 위하여 입력 400 Vdc 출력

전압 180 Vdc의 1 kW ZVS Full-bridge PWM 컨버터를 설계하고 제작하였다. 시뮬레이션에 사용된 컨버터의 설계 값은 표 1에 정리하였다.

스위칭 주파수는 입력 면에서는 100 kHz이고 출력 면에서는 200 kHz이다. 출력 인덕터는 260 uH이고 출력 캐패시터는 44 uF이다. 부하 전류는 100 Hz 주기로 변하고 1/2 구간은 부하가 0이고 1/2 구간은 최고값이 10 A 인 사다리꼴 모양의 펄스 부하이다.(rising/falling time : 100usec) 제어기는 cut-off 주파수가 10 kHz이고 위상 여유가 60° 이상이 되도록 설계하였다.

표 2는 실험에 사용된 1 kW ZVS Full-bridge 컨버터에 제작, 사용된 IC와 소자들의 값을 정리한 것이다.

표 1 1 kW ZVS Full-bridge 컨버터의 설계값

	값	비고
스위칭 주파수	100 kHz	출력 200kHz
입력 전압	400 Vdc	
출력 전압	180 Vdc	
출력 인덕터	260 uH	
출력 캐패시터	44 uF	
부하전류 주파수	100 Hz	부하가 0인
부하 전류의 peak값	10 A	구간 1/2
제어기 cut-off 주파수	10 kHz	
제어기 위상 여유	60°	

표 2 실험에 사용된 하드웨어의 소자값

	값/부품명	비고
변압기	PQ 4040 2개	1차:35, 2차:12+12
구동 변압기	EI 2219	1차:10, 2차:10씩
출력 인덕터	260 uH(20A)	Magnetics 55111
공진 인덕터	10 uH(20A)	PQ3220(air gap)
출력 캐패시터	44 uF(250V)	전해
스위치	2SK2837	600V, 20A
다이오드	FML36S	600V, 20A
제어 IC	UC3875	phase shift controller
gating 구동 IC	TC4420	
Op-amp IC	LM2902	Quad op-amp
AND logic IC	MC14081	Quad and
NAND logic IC	MC14011	Quad nand

3.2 시뮬레이션 결과 및 동특성 분석

시뮬레이션의 위쪽 파형은 출력 전압이고 중간 파형은 op-amp의 포화를 고려한 제어 전압이고 마지막 파형은 부하 전류 파형이다. 출력에는 47kΩ 5개 병렬의 dummy 저항을 삽입하였다. 그림 4는 선형 feedback 제어기만을 사용한 출력 전압의 특성이다. 기본적으로 부하가 0인 구간에서도 phase shift 제어를 하므로 모든 스위치의 gating 신호는 연속적으로 발생한다. 부하가 0이 되는 시점에서 출력 전압 overshoot가 발생하고 제어 전압은 차츰 떨어진다. 부하가 오픈된 구간에서 발생한 overshoot 전압은 dummy 저항에 의해서만 방전되는데 제어 기준 전압보다 항상 높게 유지되므로 제어기는 하한값으로 포화되고 부하가 다시 흐르는 시점에서 하한값으로 포화된 제어 전압에 의해 제어기의 동특성이 느려져서 출력 전압에 매우 큰 notch 전압이 발생한다.

그림 5는 필터를 거쳐 측정된 부하 전류가 0.2 A보다 작을 때 gating 신호를 차단하는 제안된 제어기의 시뮬레이션 파형이다. 그림에서 보듯이 부하가 0이 될 때 컨버터의 출력 인덕터 전류가 0이 되기 전에 미리 컨버터의 스위칭을 중단하므로 전압의 overshoot가 선형제어기보다 작아진다. 하지만 여전히 부하가 오픈된 구간에서 제어 기준 전압보다 출력 전압이 높게 유지되는 구간이 더 크므로 제어기는 하한값에 가깝게 되고 부하가 흐르

는 구간에서 notch 전압이 발생한다. 하지만 선형 제어기보다 출력의 변동폭이 약간 개선되고 부하가 오픈된 구간에서 스위칭을 하지 않으므로 스위칭 손실이 개선된다.

그림 6은 측정된 부하 전류가 2.5 A보다 작을 때 gating 신호를 차단하는 제안된 제어기의 시뮬레이션 파형이다. 그림 5보다 미리 컨버터의 스위칭을 중단하므로 전압의 overshoot가 선형제어기보다 더욱 작아진다. 최적 설계에 의해 부하가 오픈된 구간에서 제어 기준 전압보다 높은 구간과 제어 기준 전압보다 낮은 구간의 면적이 같으므로 제어기는 정상 상태값에 가깝고 부하가 흐르기 시작하는 구간에서 거의 notch 전압이 발생하지 않는다.

그림 7은 측정된 부하 전류가 4 A보다 작을 때 gating 신호를 차단하는 제안된 제어기의 시뮬레이션 파형이다. 그림 6보다 미리 컨버터의 스위칭을 중단하므로 전압의 overshoot가 매우 작아진다. 부하가 오픈된 구간에서 dummy 저항에 의해 방전되는 전압은 제어기 알고리즘에 의해 출력 전압 하한값에서 간헐적인 스위칭으로 유지된다. 부하가 오픈된 구간에서 제어 기준 전압보다 높게 유지되는 구간의 면적보다 제어 기준 전압보다 낮은 구간의 면적이 크므로 제어기는 상한 값에 포화되고 부하가 흐르기 시작하는 구간에서 반대로 overshoot 전압이 발생한다.

이렇듯이 제안된 제어기는 gating을 차단하기 위한 기준 부하 전류 크기, 부하의 특성, 출력 전압 제어 수준(하한값), 제어기 전압의 포화 상한/하한값, 제어기 속도, 출력 dummy 저항과 출력 캐패시터 크기, 부하 오픈 구간의 주기 등에 의해 출력 전압의 동특성을 최적 설계할 수가 있다.

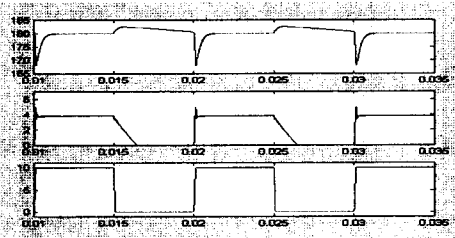


그림 4 선형 제어기만을 사용한 경우

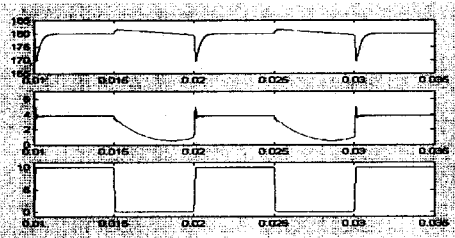


그림 5 제안된 제어기를 사용한 경우 (I=0.2A)

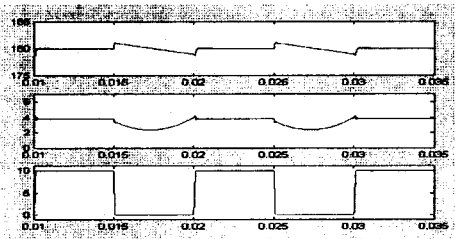


그림 6 제안된 제어기를 사용한 경우 (I=2.5A)

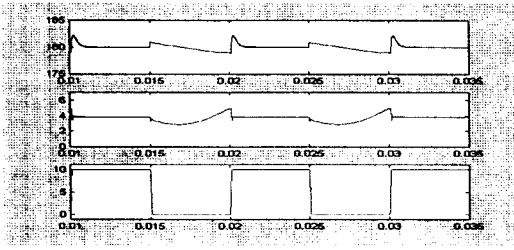


그림 7 제안된 제어기를 사용한 경우 (I=4A)

4. 실험 결과 및 분석

설계된 1 kW 컨버터의 실험 과정을 얻기 위하여 실제 제조 제작하였다. 부하 전류의 조건은 100 Hz 주기로 변하고 부하가 0인 구간이 2/3이다. 전자 부하의 용량으로 인해 부하전류는 peak 값이 2A로 제한된 사다리꼴의 구형파이다. 그림의 위쪽은 부하 전류 파형이고 중간은 출력 전압, 아래쪽은 gating 신호이다.

그림 8에서 보듯이 feedback 선형제어기의 경우 부하가 흐르는 시점에서 전압의 notch가 발생하고 부하 전류가 0이 되는 시점에서 overshoot가 발생한다. 그 크기가 4V로 출력 전압의 2.2%나 된다. 그리고 스위치의 gating 신호가 부하의 유무에 관계없이 연속적으로 발생하는 것을 볼 수가 있다.

그림 9에서 보듯이 부하가 0이 되면 gating 신호가 차단되는 것을 볼 수가 있다. 동시에 출력 전압은 컨버터의 dummy 저항에 의해 전압이 출력 하한까지 떨어지고 이후에는 간헐적인 스위칭에 의해 출력 전압이 유지되는 것을 볼 수가 있다. 그러나 그림 7의 시뮬레이션 파형과 같이 부하 전류가 흐르기 시작하는 시점에서 전압 overshoot가 발생하는데 이것은 출력 전압이 제어 전압보다 낮으므로 제어기 전압이 상한 값으로 포화되어서 발생하는 것이다. 결과적으로 출력 전압의 ripple이 1.5V 정도로 선형제어기에 비해 출력 전압 동특성이 향상되는 것을 볼 수가 있다.

전체적인 효율 면에서도 제안된 제어기를 채택한 회로의 효율이 향상되는 것을 볼 수가 있고 동시에 부하가 작은 경우이므로 스위칭 손실이 지배적이라서 효율 증가는 더욱 크다. 게다가 스위칭 주파수가 높은 경우에는 제어기 소비전력도 무시할 수가 없다. 제안된 제어기의 스위칭이 줄어드는 효과로 인하여 기존의 제어기보다 소비전력이 절반으로 줄어드는 것을 볼 수가 있다. 표 3은 제어 방법에 따르는 측정 효율을 비교한 것이다.

표 3 기존 제어기와 제안된 제어기의 효율 비교

	선형제어기	제안된 제어기	비고
출력 전력	118 W		
입력 전력	150 W	126.5 W	23.5 W 개선
효율	78.6 %	93.2 %	
제어기 소비전력	2.8 W	1.4 W	50 % 개선

이 논문은 삼성 SDI의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

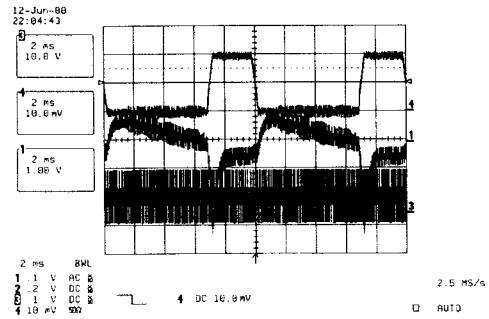


그림 8 feedback 선형 제어기를 사용한 실험 파형 (1A/div. 1V/div. 10V/div.)

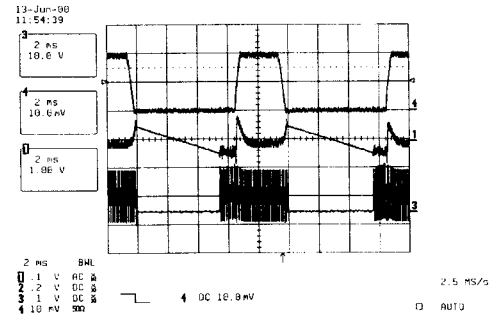


그림 9 제안된 제어기의 실험 파형 (1A/div. 1V/div. 10V/div.)

5. 결론

본 논문에서는 주기적인 펄스 부하를 갖는 ZVS Full-bridge PWM 컨버터의 효율을 증가시키기 위해서 부하가 0이 될 때 gating 신호를 차단하는 제어 방법을 제안하였다. 시뮬레이션과 1 kW 컨버터를 제작, 실험을 통하여 효율 개선과 출력 전압의 동특성이 향상되는 것을 증명하였다. 기존의 feedback 선형 제어기에 적은 비용으로 제어 방법만을 이용하여 컨버터의 효율과 동특성을 향상시키는 장점이 있다.

참고 문헌

- [1] G. Hua, F. C. Lee, M. M. Jovanovic, "An improved zero-voltage-switched resonant-transition PWM converter using a saturable inductor," PESC, pp 189-194, 1991
- [2] J. A. Sabate, V. Vlatkovic, R. Ridley, F. C. Lee, "High-voltage, high-power, ZVS, full-bridge PWM converter employing an active switch," APEC, pp 158-163, 1991
- [3] G. Hua, F. C. Lee, "A new class of ZVS-PWM converters," HFPC, pp 244-251, 1991
- [4] R. Farrington, M. M. Jovanovic, F. C. Lee, "A new family of isolated zero-voltage-switched converters," PESC, pp 209-215, 1991