

손실을 최소화한 새로운 영전류 스위칭 방식의 PWM 컨버터

마근수, 김양모
충남대학교 전기공학과

New Zero-Current-Switching PWM Converters with Low Switching Loss

Keunsu Ma and Yangmo Kim
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - In conventional zero-current-switching(ZCS) PWM converters, the switching loss, stress and noise can't be minimized because they adopt auxiliary switches operated in hard-switching. In this paper, new ZCS-PWM converters of which auxiliary switches always operate with soft-switching are proposed. Therefore, the proposed ZCS-PWM converters are most suitable for systems requiring high-power density. The characteristics of these converters are verified by results of simulation.

1. 서 론

기존의 펄스 폭 변조(PWM) 방식의 dc/dc 컨버터에 있어서 고속의 스위칭 주파수로 인한 손실은 공진형 스위치의 사용으로 현저하게 감소시킬 수 있다. 그러나, 이러한 공진형 컨버터는 일반적으로 전도손실의 증가를 초래하므로, 전도손실이 전력밀도를 제한하는 요인이 되고 있다[1-3][7]. 영전류 혹은 영전압 스위칭방식의 PWM 컨버터는 스위칭 스트레스와 영전류 및 영전압 스위칭으로 인한 스위칭 손실의 저감뿐만 아니라 종래의 PWM 컨버터의 장점을 갖추고 있어 현재 많은 연구가 진행되고 있다[4-6].

이와 같은 장점을 지닌 영전류 혹은 영전압 스위칭방식의 PWM 컨버터는 전력을 전달하는 주 스위치 이외에도 보조 스위치가 추가되어 출력전압을 제어하게 되는데, 일반적으로 보조 스위치는 강제 스위칭방식을 택함에 따라, 이로 인해 주 스위치의 소프트 스위칭에도 불구하고 보조 스위치의 강제 스위칭으로 인한 스위칭 손실과 전도 노이즈 등의 단점은 계속 초래된다[8].

본 논문에서는 기존의 영전류 스위칭(ZCS) 방식의 PWM 컨버터에서 사용되는 강제 스위칭 방식의 보조 스위치를 영전류 턴 온, 영전압 턴 오프를 가능하게 하는 새로운 방식의 ZCS-PWM 컨버터를 제안하였다. 따라서 각 스위치의 스위칭 손실 및 스트레스를 최소화하여 전력전달효율을 향상시킬 수 있다. 승압형 컨버터의 해석 및 시뮬레이션을 통하여 특성을 확인하였다.

2. 제안된 컨버터의 동작원리 및 해석

그림 1은 제안된 영전류 스위칭방식의 승압형(Boost) 컨버터이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 제안된 컨버터의 주 회로는 기존의 승압형 PWM 컨버터와 동일하며, 주 스위치의 영전류 스위칭을 위하여 보조 스위치 S_a , 공진 캐패시터 C_r , 및 공진 인덕터 L_r 를 추가하였다. 컨버터의 스위칭 동작을 나타내는 스위치 모드는 그림 2에서와 같이 7개로 구성된다. 여기서 입력 인덕터 및 출력 캐패시터의 용량이 충분히 크다고 가정하면 입력 전류 i_L 과 출력전압 V_o 는 일정하게 유지되므로 전류원과 전압원으로 대체할 수 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이

모드 0은 기존 승압형 PWM 컨버터의 전력전달 모드와 동일하고, 모드 2는 기존 승압형 PWM 컨버터에서 출력 캐패시터의 방전모드와 동일하다. 이 때, 주 스위치를 영전류에서 턴-온하기 위하여 모드 1이 추가되며, C_r 과 L_r 의 공진에 의한 영전류 턴-오프를 위하여 모드 3에서 모드 6까지가 추가된다.

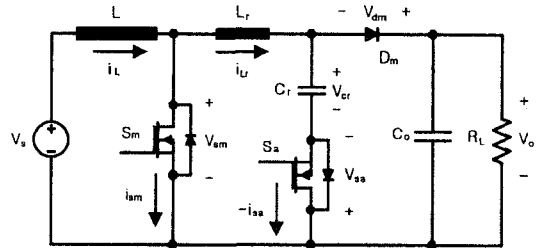


그림 1. 제안된 승압형 ZCS-PWM 컨버터

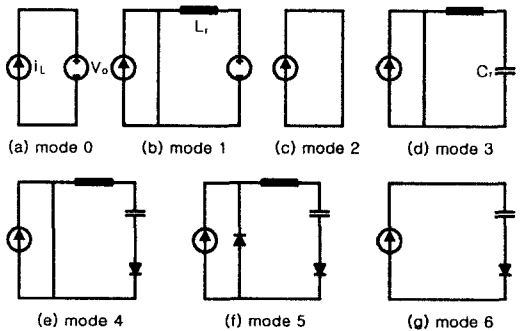


그림 2. 제안된 컨버터의 스위치 모드

각 모드를 포함한 컨버터의 한 주기 동안의 각 소자에 대한 스위칭 파형을 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3에서 보는 바와 같이 주 스위치 및 보조 스위치 S_m , S_a 는 항상 소프트 스위칭하며 기존 승압형 PWM 컨버터와 마찬가지로 전체 주기에 대한 S_m 스위치의 턴-온 시간을 조정함으로써 출력전압의 제어가 가능함을 보여준다. 각 모드에 대한 동작상태 및 해석결과는 다음과 같다.

- (1) 모드 0 : 입력측의 전력을 출력측에 전달하기 위한 전력전달 모드로서 이 모드에서 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 은 입력전류 i_L 과 같으며 공진 캐패시터 전압 V_{cr} 은 출력전압 V_o 로 충전된 상태이다.
- (2) 모드 1 : 출력전압을 제어하기 위하여 주 스위치 S_m 을 턴-온 하면 스위치 모드는 그림 2(b)와 같이 구성되며, 따라서 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 은 식(1)과 같이

감소한다.

$$i_{Lr} = i_L - \frac{V_o}{L_r}(t - t_1) \quad (1)$$

여기서 t_1 은 모드 1이 시작되는 시간이다. 그러므로 스위치 S_m 은 영전류에서 식(1)의 기울기로 전류가 증가하면서 턴-온 한다.

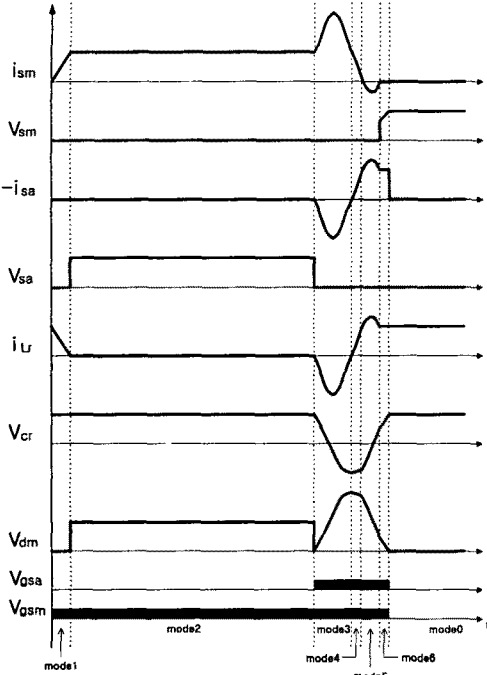


그림 3. 한 주기 동안의 스위칭 파형

(3) 모드 2 : 그림 2(c)와 같이 입력과 출력이 분리되어 출력 캐패시터에 저장된 전력이 부하에 전달되는 모드이다. 모드 1에서 공진 인덕터의 전류가 영이 되면 주 다이오드 D_m 의 전류가 영이 되어 주 다이오드가 턴-오프 된다.

(4) 모드 3 : 주 스위치 S_m 을 턴-오프 하기 위하여 보조 스위치 S_a 를 켜면 그림 2(d)와 같이 공진회로가 형성되며 이 모드에서 캐패시터 C 과 인덕터 L_r 은 식(2), 식(3)과 같이 공진한다.

$$V_{cr} = V_o \cos[w_r(t - t_3)] \quad (2)$$

$$i_{Lr} = -\frac{V_o}{Z} \sin[w_r(t - t_3)] \quad (3)$$

여기서 t_3 는 모드 3이 시작되는 시간이며, 공진회로의 특성임피던스 Z , 공진주파수 w_r 은 다음과 같다.

$$Z = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (4)$$

$$w_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (5)$$

또한, 주 스위치 S_m 에 흐르는 전류는 식(6)과 같다.

$$i_{sm} = i_L + \frac{V_o}{Z} \sin[(w_r - t_3)] \quad (6)$$

이 모드에서 보조 스위치에 흐르는 전류 i_{sa} 는 $-i_{Lr}$ 과 같으며, i_{Lr} 이 양(+)이 되면 보조 스위치의 내부 다이오드가 턴-온 한다.

(5) 모드 4 : 전류 i_{Lr} 이 양이 되면 그림 2(e)와 같이 S_a 의 내부다이오드가 켜지면서 L_r , C_r 은 계속 공진한다. 이 때, 보조 스위치 S_a 의 게이트에 오프신호를 발생시켜 주어야 한다.

(6) 모드 5 : 전류 i_{sm} 이 음(-)이 되면 주 스위치의 전류는 S_m 의 내부 다이오드를 통하여 흐르면서 L_r , C_r 은 공진을 계속한다. 또한, 이 모드에서 S_m 의 게이트에 오프신호를 주면 i_{sm} 이 영이 될 때 S_m 의 내부다이오드가 턴-오프 하면서 모드를 완료한다.

(7) 모드 6 : 전류 i_{sm} 이 음이 되어 주 스위치가 꺼지면 입력전류 i_L 은 보조 스위치의 내부 다이오드를 통하여 그림 2(g)와 같이 공급되며 출력 캐패시터에는 입력전류가 흐르므로 V_{cr} 은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{cr} = V_{cr}(t_6) + \frac{1}{C_r} \int_{t_6}^t i_L(t) dt \quad (7)$$

여기서 t_6 는 모드 6이 시작되는 시간이며, $V_{cr}(t_6)$ 는 모드 6의 출력 캐패시터 초기전압이다. 따라서 V_{cr} 이 출력전압 V_o 로 충전되면 보조 스위치의 내부 다이오드가 턴-오프 되어 한 주기를 종료하게 된다.

이상의 모드 0에서 모드 6은 회로의 각 동작상태를 나타내며 한 주기를 구성하게 된다. 그러므로 이 주기가 반복되면서 컨버터의 스위칭이 이루어진다.

3. 제안된 컨버터의 특징 및 회로의 확장

스위칭 동작에 대한 해석결과, 제안된 컨버터의 주 스위치는 소프트 스위칭 조건으로 턴-온 및 턴-오프 한다. 또한, 제안된 컨버터의 각 스위치들은 모두 소프트 스위칭 조건에 있게 된다. 특히, 보조 스위치는 주 스위치의 턴-온 시간을 결정함으로써 PWM 컨버터와 같이 전도 손실을 최소화할 수 있게 되는데, 기존의 강제 스위칭 방식을 소프트 스위칭 방식으로 개선하였다. 표 1에서는 제안된 컨버터의 각 스위치들에 대한 스위칭 조건을 나타내었다.

표 1. 각 스위치에 대한 스위칭 조건

스위치		스위칭 조건
주 스위치	ON	Zero-current
	OFF	Zero-current
보조 스위치	ON	Zero-current
	OFF	Zero-voltage
주 다이오드	ON	Zero-voltage
	OFF	Zero-current

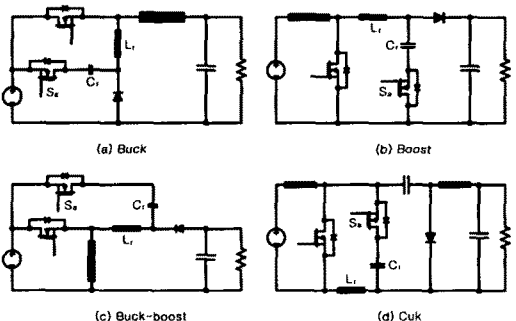


그림 4. 확장된 ZCS-PWM 컨버터 회로

그림 4에서와 같이 제안된 컨버터의 소프트 스위칭

요소인 보조 스위치 S_o , 공진 캐패시터 C_r 및 공진 인덕터 L_r 를 주 스위치와 병렬로 배치하고 및 주 다이오드를 공진 인덕터와 공진 캐패시터가 접속된 노드에 배치함으로써 승압형 컨버터 이외의 다른 기본적인 컨버터 형태인 강압형(Buck), 승강압형(Buck-boost), Cuk형 등으로 확장이 가능하다. 따라서 각 컨버터는 단지 전류, 전압의 크기가 달라질 뿐 그림 3과 같은 승압형 컨버터의 해석결과와 동일한 해석결과를 나타내며 새로운 ZCS-PWM 컨버터 군(Family)을 형성한다.

4. 시뮬레이션 결과

그림 5~그림 7은 제안된 승압형 ZCS-PWM 컨버터의 각 스위치에 대한 Spice 시뮬레이션 결과이며 해석 결과에서와 같이 각 스위치는 영전류 혹은 영전압에서 스위칭함을 알 수 있다. 표 2는 시뮬레이션에 사용된 컨버터의 사양을 나타낸다.

표 2. 시뮬레이션을 위한 컨버터 사양

입력전압 (V_i)	20 ± 5 [V]
출력전압 (V_o)	48 [V]
출력전력 (P_o)	200 [W]
스위칭 주파수 (f_s)	100 [KHz]
공진 주파수 (f_r)	1.0 [MHz]
공진 인덕턴스 (L_r)	0.545 [uH]
공진 캐패시턴스 (C_r)	0.0464 [uF]

한편, 주 스위치가 영전류에서 턴-오프하기 위해서는 식(8)의 조건을 만족해야 하며 이로부터 표 2의 L_r 및 C_r 은 식(5)와 식(8)으로부터 결정할 수 있다.

$$\frac{V_o}{Z} \geq i_L \quad (8)$$

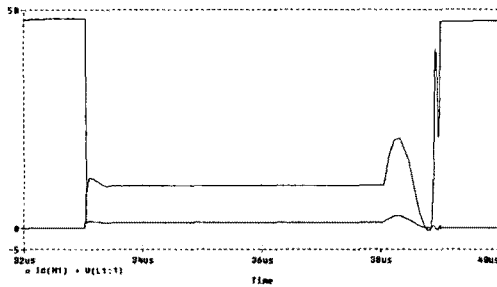


그림 5. 주 스위치의 전류 및 전압 파형

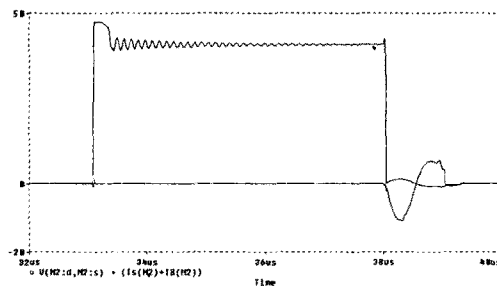


그림 6. 보조 스위치의 전류 및 전압 파형

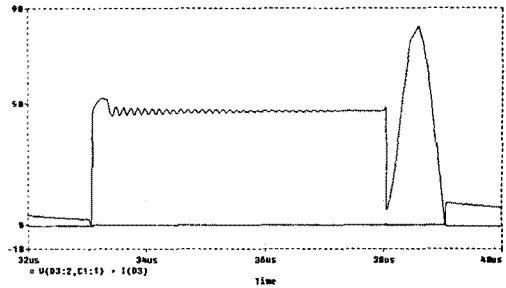


그림 7. 주 다이오드의 전류 및 전압 파형

5. 결 론

본 논문에서는 컨버터에 포함된 모든 스위치가 턴-온 및 턴-오프시에 소프트 스위칭이 가능한 새로운 방식의 ZCS-PWM 컨버터를 제안하였다. 따라서 기존 ZCS-PWM 컨버터의 장점과 더불어 다음과 같은 장점을 갖는다.

- (1) 각 스위치의 소프트 스위칭에 따른 스위칭 손실의 최소화가 가능하다.
- (2) 주 스위치의 전류/전압 스트레스 및 전도손실의 최소화화가 가능하다.
- (3) 기존 PWM 컨버터와 같이 일정 주파수에서 PWM 제어가 가능하다.
- (4) 고주파 스위칭이 용이하다.

그러므로, 제안된 ZCS-PWM 컨버터는 높은 전력밀도를 요구하는 시스템에 적용할 수 있다. 승압형 ZCS-PWM 컨버터에 대한 해석 및 시뮬레이션 검증을 통하여 특성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Freeland, R.D. Middlebrook, "A unified analysis of converters with resonant switches", IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., pp.20-30, 1987
- [2] C.P. Henze, H.C. Martin, D.W. Parsley, "Zero-voltage-switching in high frequency power converters using pulse width modulation", IEEE Applied Power Electronics Conf. Proc., pp.33-40, 1988
- [3] G. Hua, F.C. Lee, "A new class of ZVS-PWM converters" High Frequency Power Conversion Conf. Proc., pp.244-251, 1991
- [4] G. Hua, C. Leu and F.C. Lee, "Novel zero-voltage-transition PWM converters", IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., pp.56-61, 1992
- [5] G. Hua, E. X. Yang, Y. Jiang and F. C. Lee, "Novel zero-current-transition PWM converters", IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., pp.538-544, 1993
- [6] B.T. Lin, Y.S. Lee, "A unified approach to modeling, synthesizing, and analyzing quasi-resonant converters", IEEE Trans. Power Electronics, Vol.12, pp.983-992, 1997
- [7] 마근수, 최진호, 김양모, "dc/dc 컨버터의 스위칭 소자의 전압 스트레스", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1019-1021, 1992
- [8] 마근수, 정규범, "영전류 스위칭 방식의 PWM 컨버터", 대한전자공학회 회로 및 시스템/전력전자 연구회 합동학술발표회 논문집, pp.32-34, 1994