

New Zero-Current-Switching PWM Converters

馬 根 洙* · 金 良 模**
(Keun-Soo Ma · Yang-Mo Kim)

Abstract - In conventional zero-current-switching(ZCS) PWM converters, zero-current turn-off for main switch without increasing voltage/current stresses is achieved at a fixed frequency. The switching loss, stress, and noise, however, can't be minimized because they adopt auxiliary switches turned off and main switches turned on under hard-switching condition. In this paper, new ZCS-PWM converters of which all switches are always operating with soft-switching condition are proposed. Therefore, the proposed ZCS-PWM converters are most suitable for systems requiring high-power density. Breadboarded ZCS-PWM boost converters using power MOSFET are constructed to verify theoretical analysis.

Key Words : Resonant switch, ZCS-PWM converter, Auxiliary switch, Conduction loss, Current/voltage stress

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 정현파 전류/전압에 의하여 스위치를 구동하는 방식이므로 스위치의 전류/전압 스트레스가 증가하고 결과적으로 전도손실의 증가를 초래한다. 따라서, 전도손실이 컨버터의 전력변환효율을 제한하는 요인이 되고 있다[1-4]. 영전류/영전압 스위칭 방식의 PWM 컨버터는 공진형 컨버터의 영전류/영전압 스위칭으로 인한 전도손실과 PWM 컨버터의 강제 스위칭으로 인한 스위칭 손실을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라 종래의 PWM 컨버터의 장점을 갖추고 있어 연구가 진행되어 왔다[5,6].

이와 같은 컨버터중에서 특히, 영전류 스위칭방식의 PWM 컨버터는 전력을 전달하는 주 스위치 이외에도 보조 스위치가 추가되어 주 스위치의 영전류 턴-오프가 가능하게 되는데, 일반적으로 보조 스위치의 턴-오프는 강제 스위칭 방식을 채택함에 따라, 주 스위치의 영전류 스위칭에도 불구하고 보조 스위치의 강제 스위칭으로 인한 스위칭 손실과 전도 노이즈 등의 단점은 계속적으로 초래된다. 이와 더불어 주 스위치의 턴-온시에 보조 스위치 및 공진소자가 포함된 지로(Branch)의 영향을 받지 않게 되어 기존의 강제 스위칭 방식 PWM 컨버터의 턴-온시와 동일하게 동작하므로

이로 인하여 스위칭 손실이 더욱 증가하게 된다[7-10].

본 논문에서는 기존의 영전류 스위칭 방식의 PWM 컨버터에서 사용되는 강제 스위칭 방식의 보조 스위치 및 주 스위치를 각각, 영전압 턴-오프, 영전류 턴-온이 가능한 새로운 영전류 스위칭 방식의 PWM 컨버터를 제안하였다. 따라서 기존의 영전류 스위칭 PWM 컨버터의 장점과 더불어 컨버터에 포함된 모든 스위치의 스위칭 손실 및 전도손실을 최소화하여 컨버터의 전력변환효율을 개선할 수 있다. 특히, 배터리를 전원으로 사용하는 우주 발사체 및 인공위성의 부하측 컨버터와 배터리 충/방전기의 경우, 5~60[Watts]급의 비교적 소용량 dc/dc 컨버터가 많이 사용되지만 무게와 크기에 대한 요구조건이 지상에서 운용되는 전력시스템과 비교하여 대단히 민감하기 때문에 소형, 경량화된 고전력밀도 전력변환장치가 요구된다. 그러므로, 이러한 요구조건을 만족하기 위한 전력회로로서 제안된 컨버터가 적용될 수 있다. 본 논문에서는 제안된 컨버터의 특성을 확인하기 위하여 영전류 스위칭 PWM 승압형 컨버터를 동작모드에 따라 해석하였고 실험을 통하여 검증하였다.

2. 제안된 컨버터의 동작원리 및 해석

그림 1은 제안된 영전류 스위칭 승압형 컨버터이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 제안된 컨버터의 주 회로는 기존의 승압형 PWM 컨버터와 동일하며, 주 스위치의 영전류 스위칭을 위하여 공진 인덕터 L_r , 공진 캐패시터 C_r , 및 보조 스위치 S_0 를 추가하였다. 여기에서 보조 스위치 S_0 는 각 스위칭 소자의 전류/전압 스트레스를 줄이기 위하여 주 스위치의 동작시간에 비해 가능한 짧은 시간동안 동작하게 된다. 컨버터의 스위칭 동작을 나타내는 스위치 모드(Mode)는 그림 2에서와 같이 7개로 구성되며 전류가 흐르는 부분은

* 準 會 員 : 韓國航空宇宙研究院 先任研究員

** 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 7月 3日

最終完了 : 2001年 7月 27日

좁은 실선으로 나타내었다. 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.

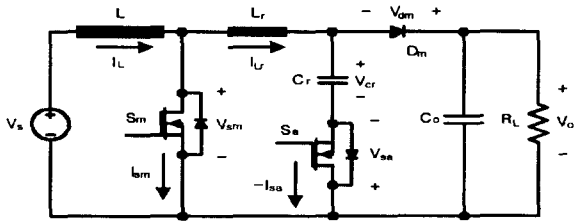


그림 1 제안된 영전류 스위칭 PWM 승압형 컨버터
Fig. 1 The proposed ZCS-PWM boost converter

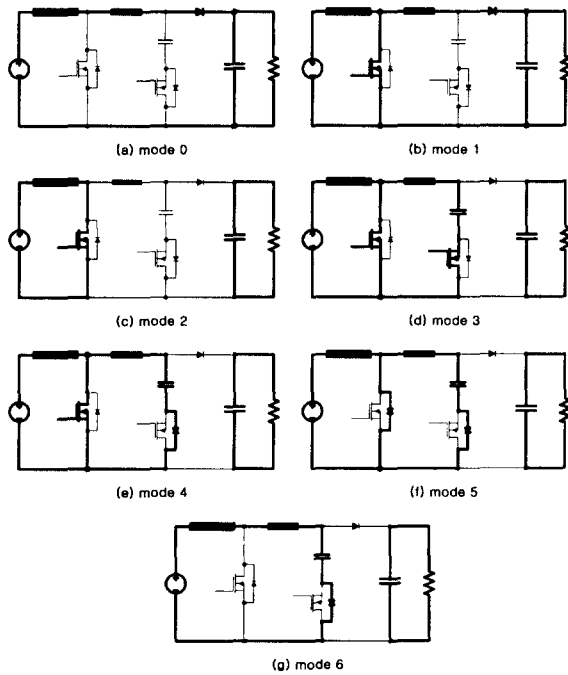


그림 2 제안된 컨버터의 스위칭 모드
Fig. 2 Switch mode of the proposed converter

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 스위치 S_m 의 턴-온 시간을 조정함으로써 출력전압의 제어가 가능함을 보여준다. 각 모드에 대한 동작상태 및 해석결과는 다음과 같다. 단, 여기에서 입력 인덕터 및 출력 캐패시터의 값은 충분히 크므로 입력전류 I_L 과

출력전압 V_o 는 일정하게 유지된다고 가정하였다.

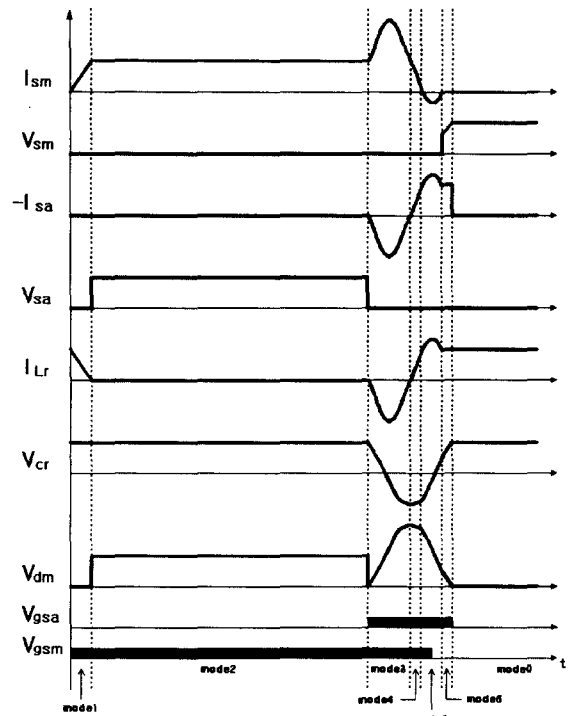


그림 3 한 주기 동안의 스위칭 파형
Fig. 3 Switching waveforms for one cycle period

1) 모드 0 : 입력측의 전력을 출력측에 전달하기 위한 전력전달 모드로서 이 모드에서 공진 인덕터 전류 I_{Lr} 은 입력 전류 I_L 과 같으며 공진 캐패시터 전압 V_{cr} 은 출력전압 V_o 로 충전된 상태이다. 또한, 공진 인덕터 L_r 에 걸리는 전압은 영이므로 주 스위치 S_m 에 걸리는 전압은 출력전압과 같고 보조 스위치 S_a 에 걸리는 전압은 영이 된다.

2) 모드 1 : 출력전압을 제어하기 위하여 주 스위치 S_m 을 턴-온 하면 스위칭 모드는 그림 2(b)와 같이 구성되며, 따라서 공진 인덕터 전류 I_{Lr} 은 식(1)과 같이 감소한다.

$$I_{Lr} = I_L - \frac{V_o}{L_r}(t - t_1) \tag{1}$$

여기서 t_1 은 모드 1이 시작되는 시간이다. 그러므로 스위치 S_m 은 영전류에서 턴-온 하면서, 식(1)의 기울기로 전류가 증가하게 된다.

3) 모드 2 : 그림 2(c)와 같이 입력단과 출력단이 분리되어 출력 캐패시터에 저장된 에너지가 부하에 전달되는 모드이다. 모드 1이 종료되면서 공진 인덕터의 전류가 영이 되

면 주 다이오드 D_m 의 전류도 영이 되어 주 다이오드 스위치가 영전류에서 턴-오프 되고 보조 스위치 S_a 와 주 다이오드 D_m 의 전압은 출력전압과 같아지게 된다.

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

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

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

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

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

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

또한, 주 스위치 S_m 에 흐르는 전류는 식(6)과 같이 된다.

$$I_{sm} = I_L + \frac{V_o}{Z} \sin[\omega_r(t - t_3)] \quad (6)$$

이 모드에서 보조 스위치에 흐르는 전류 I_{sa} 는 $-I_{Lr}$ 과 같으므로 영전류에서 턴-온 하게 되고, 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 턴-온이 되면서 L_r, C_r 은 계속 공진한다. 모드 4가 시작되는 시점부터 스위칭 주기가 완료되기 전에 보조 스위치 S_a 가 다시 턴-온 되는 것을 막기 위하여 게이트에 오프신호가 발생되어야 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 영이 되어 주 스위치가 턴-오프 하면 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 되고 보조 스위치는 영전압에서 턴-오프, 주 다이오드는 영전압에서 턴-온이 되면서 한 주기를 다시 시작하게 된다. 이상의 모드 0에서 모드 6은 회로의 각 동작상태를 나타내며 한 주기를 구성하게 되고 이 주기가 반복되면서 컨버터의 스위칭이 이루어진다.

3. 제안된 컨버터의 특징 및 회로의 확장

스위칭 동작에 대한 해석결과, 제안된 컨버터의 모든 스위치들은 소프트 스위칭 조건으로 턴-온 및 턴-오프 한다. 특히, 보조 스위치는 주 스위치의 턴-온 시간을 결정하고 짧은 턴-온 시간으로 인하여 PWM 컨버터와 같이 주 스위치의 전도손실을 최소화할 수 있게 되는데, 기존의 강제 스위칭 방식을 소프트 스위칭 방식으로 개선하였고, 공진 인덕터를 사용하여 주 스위치의 영전류 턴-온을 가능하게 하였다. 표 1에서는 제안된 컨버터의 각 스위치들에 대한 스위칭 조건을 나타내었다.

표 1 컨버터에 포함된 각 스위치에 대한 스위칭 조건
Table 1 Switching conditions of each switches in the proposed converter

스위치		스위칭 조건
주 스위치(S_m)	ON	Zero-current
	OFF	Zero-current
보조 스위치(S_a)	ON	Zero-current
	OFF	Zero-voltage
주다이오드(D_m)	ON	Zero-voltage
	OFF	Zero-current

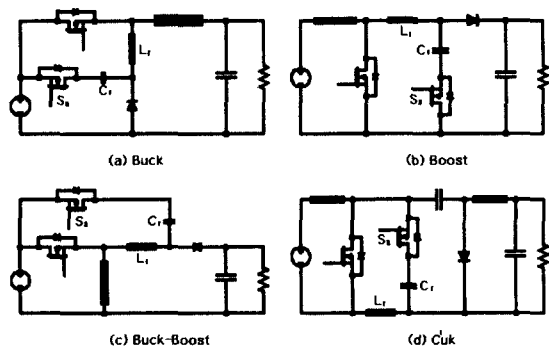


그림 4 확장된 영전류 스위칭 PWM 컨버터 회로
Fig. 4 The expanded ZCS-PWM topologies

그림 4에서와 같이 제안된 컨버터의 소프트 스위칭 요소인 보조 스위치 S_m , 공진 캐패시터 C_r 및 공진 인덕터 L_r 를 주 스위치와 병렬로 배치하고 주 다이오드를 공진 인덕터와 공진 캐패시터가 접속된 노드에 배치함으로써 승압형 컨버터이외의 다른 기본적인 컨버터 형태인 강압형(Buck), 승강압형(Buck-Boost), C'uk형 등으로 확장이 가능하다. 따라서 각 컨버터는 단지 소자의 전류, 전압의 크기가 달라질 뿐 그림 3과 같은 승압형 컨버터의 해석결과와 동일한 결과를 나타내며 새로운 영전류 스위칭 PWM 컨버터 군(Family)을 형성한다.

4. 설계기준 및 실험 결과

제안된 컨버터를 설계하기 위한 기준은 다음과 같다. 먼저, 주 스위치가 영전류에서 턴-오프 하기 위해서 주 스위치 전류 I_{sm} 은 반드시 음 혹은 영이 되어야 하므로 식(8)의 조건을 만족해야 한다. 이와 함께 주 스위치의 턴-오프 신호는 I_{sm} 이 음인 기간에 발생되어야 한다.

$$\frac{V_o}{Z} \geq I_L \tag{8}$$

또한, 전류/전압 스트레스를 최소화하기 위하여 보조 스위치는 주 스위치의 턴-오프 시점 근처에서 가능한 짧은 턴-온 시간을 가져야 하며 보조 스위치가 영전압에서 턴-오프 하기 위해서는 보조 스위치를 흐르는 공진 전류가 반주기 이후인 모드 3 이후에 턴-오프 신호가 발생되어야 한다. 여기서, 공진주파수를 결정하는 파라미터인 L_r 및 C_r 의 값은 식(8)의 조건과 식(5)로부터 결정할 수 있다.

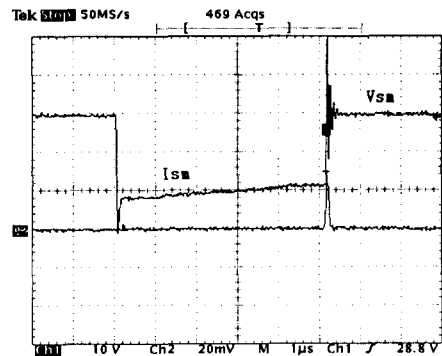
이상의 해석결과들을 증명하기 위하여 실험을 수행하였으며 표 2는 실험에 적용된 컨버터의 사양을 나타낸다. 여기에서 공진주파수는 보조 스위치의 도통시간을 충분히 짧게 하기 위하여 스위칭 주파수의 10배로 설정되었고 공진 파라미터는 식(8)과 식(5)로부터 계산하였다. 또한 주 스위치의 게이트 신호는 대략 0.5의 시비율(Duty ratio)을 가지며 보조 스위치의 게이트 신호는 공진주파수를 고려하여 약 1.0 [μ s]의 주기로 설정되었다.

그림 5~그림 7은 실험결과를 나타낸다. 그림 5와 그림 6에서는 제안된 컨버터에서 보조 스위치와 공진소자만을 제외한 기존의 PWM 방식 컨버터와 제안된 컨버터를 30[W] 부하용량의 동일한 사양으로 제작하여 비교하였다. 먼저, 그림 5는 기존 PWM 컨버터와 제안된 컨버터 주 스위치의 전류/전압을 나타낸다. 그림 5(a)의 실험결과에서 보는 것처럼, 기존 PWM 컨버터에서는 턴-온 및 턴-오프시에 전류/전압이 교차되는 구간이 발생하게 되며, 특히 턴-오프시에는 높은 di/dt로 인한 전압 스파이크가 높게 나타나므로 스위칭 손실과 스트레스를 발생하게 된다. 반면, 제안된 영전류 스위칭 PWM 컨버터에서는 그림 5(b)에서 보는 것처럼 턴-온 및 턴-오프시 모두 영전류 스위칭으로 인한 전류/전압의 교차구간을 최소화할 수 있고 낮은 di/dt로 전압 스파이크가 감소시킬 수 있으므로 발생하는 손실은 현저하게 감소된다.

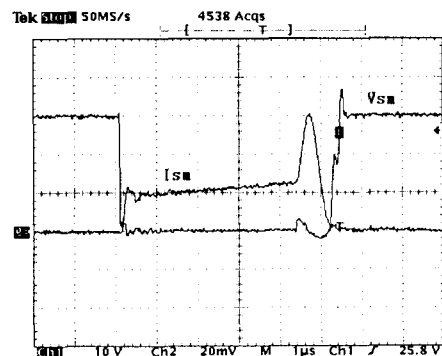
표 2 실험을 위한 제안된 컨버터 사양

Table 2 Components and parameters utilized in the breadboarded converter

입력전압(V_i)	15[V]	
출력전압(V_o)	30[V]	
출력전력(P_o)	30[W]	60[W]
공진 인덕턴스(L_r)	1.0[μ H]	0.5[μ H]
공진 캐패시턴스(C_r)	0.022[μ F]	0.044[μ F]
입력 인덕터(L)	100[μ H]	
출력 캐패시터(C_o)	470[μ F]	
주 스위치(S_m)	IRF540	
보조 스위치(S_a)	IRF520	
주 다이오드(D_m)	50SQ100	
공진 주파수(f_r)	1.0[MHz]	
스위칭 주파수(f_s)	100[kHz]	



(a) 기존 PWM 컨버터(2A/div, 10V/div)



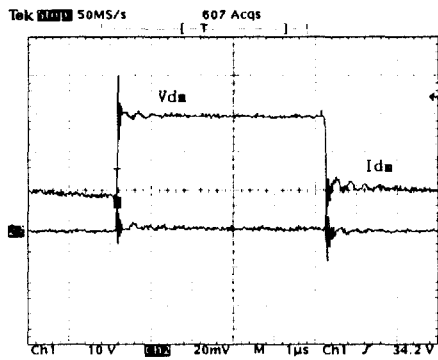
(b) 제안된 영전류 스위칭 PWM 컨버터 (2A/div, 10V/div)

그림 5 30[W] 부하에서 주 스위치의 전류, 전압 파형 비교
Fig. 5 Comparison of current and voltage waveforms for main switch at 30[W] load

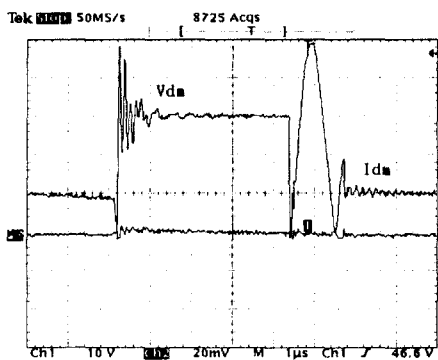
그림 6은 기존 PWM 컨버터와 제안된 컨버터 주 다이오드의 전류/전압을 나타낸다. 그림 6(a)로부터 기존 PWM 컨버터의 주 다이오드는 턴-온 및 턴-오프 시 스위칭 손실이 발생함을 알 수 있으며, 제안된 컨버터는 그림 6(b)에서 보는 것처럼 거의 손실을 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 그림 6(b)에서 주 다이오드의 전압 링잉(Ringing) 현상은 주 다이오드의 턴-오프에서 발생하는 것으로서 주 다이오드와 연결된 경로를 짧게 배선하고 주 다이오드의 전류측정을 위한 와이어등에 의한 기생 인덕턴스를 제거하면 감소될 것으로 판단된다. 그러나, 실험결과에서 나타낸 것처럼 이로 인해 발생하는 스위칭 손실은 거의 없다.

그림 7은 60[W] 부하용량으로 제작된 제안된 컨버터의 주요 실험결과 파형을 나타내며 그림 3의 해석결과와 동일함을 알 수 있다. 특히, 그림 7(c)의 실험결과 파형에서 보는 것처럼 보조 스위치는 종래와는 달리 공진 캐패시터의 충전 전압이 출력전압과 같아지면서 영전압에서 턴-오프된다.

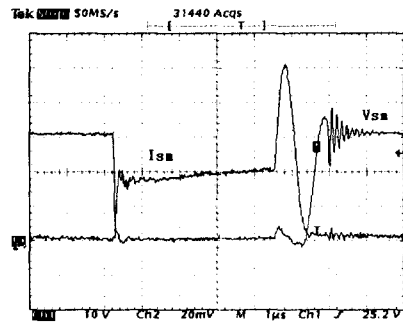
표 3은 기존 PWM 컨버터와 제안된 컨버터의 효율을 비교한 결과이다. 비교적 소용량 전력변환기에의 적용 가능성을 고려하여 30, 45, 60[Watts]의 출력전력에 대해서 효율을 측정하였으며, 결과에서 나타난 것처럼 기존 PWM 컨버터는 부하가 커짐에 따라 효율이 감소하였으나, 제안된 컨버터의 효율은 약 90[%] 효율을 유지하였다.



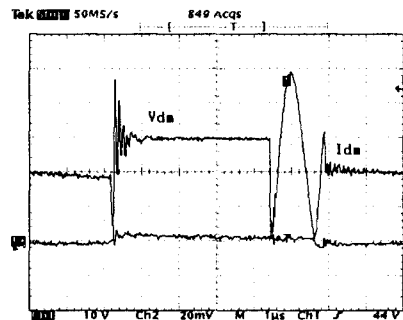
(a) 기존 PWM 컨버터(2A/div, 10V/div)



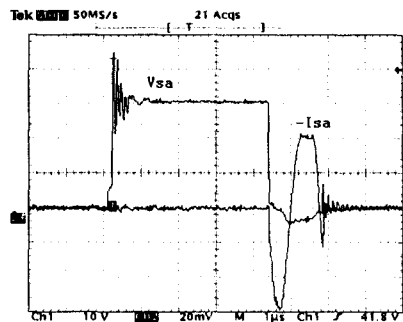
(b) 제안된 영전류 스위칭 PWM 컨버터 (2A/div,10V/div)



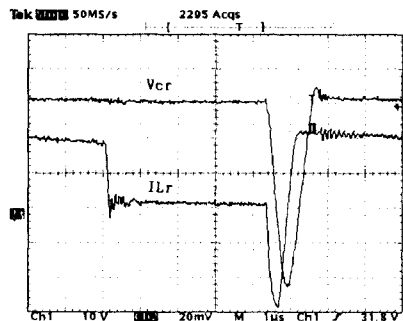
(a) 주 스위치(2A/div, 10V/div)



(b) 주 다이오드(2A/div, 10V/div)



(c) 보조 스위치(2A/div, 10V/div)



(d) 공진소자(2A/div, 10V/div)

그림 6 30[W] 부하에서 주 다이오드의 전류,전압 파형비교
Fig. 6 Comparison of current and voltage waveforms for main diode at 30[W] load

그림 7 60[W] 부하에서 제안된 컨버터의 실험결과
Fig. 7 Experimental results for proposed converter at 60[W] load

표 3 PWM 컨버터와 제안된 컨버터의 효율

Table 3 Efficiency of PWM converter and the proposed converter

출력전력[Watts]	효율[%]	
	PWM 컨버터	제안된 컨버터
30	90	91
45	89	90
60	86	91

5. 결 론

본 논문에서는 컨버터에 포함된 모든 스위치가 턴-온 및 턴-오프시에 소프트 스위칭이 가능한 새로운 방식의 영전류 스위칭 PWM 컨버터를 제안하였으며 특히, 기존의 영전류 스위칭 PWM 컨버터에서 사용되는 강제 스위칭방식의 보조 스위치 및 주 스위치를 각각, 영전압 턴-오프, 영전류 턴-온 스위칭 방식으로 개선하였다. 따라서, 다음과 같은 장점이 있다.

- 1) 각 스위치의 소프트 스위칭에 따른 스위칭 손실의 최소화
- 2) 주 스위치의 전류/전압 스트레스 및 전도손실의 저감
- 3) 기존 PWM 컨버터와 마찬가지로 일정 주파수에서 PWM 제어
- 4) 고주파 스위칭이 용이

그러므로, 제안된 영전류 스위칭 PWM 컨버터는 배터리를 전원으로 사용하는 우주 발사체 및 인공위성의 부하측 컨버터와 배터리 충/방전기와 같은 고전력밀도 전력변환장치에 적용될 수 있다. 본 논문에서는 영전류 스위칭 PWM 승압형 컨버터를 동작모드에 따라 해석하였고 실험을 통하여 컨버터의 특성을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] K. H. Liu, R. Oruganti, and F. C. Lee, "Resonant switches - topologies and characteristics," IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., pp. 62-67, 1985.
 [2] K. H. Liu and F. C. Lee, "Zero-voltage switching technique in dc-dc converters," IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., pp. 58-70, 1986.
 [3] S. Freeland and R. D. Middlebrook, "A unified analysis of converters with resonant switches," IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., pp. 20-30, 1987.
 [4] R. Rangan, D. Y. Chen, J. Yang, and J. Lee, "Application of insulated gate bipolar transistor to zero-current switching converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 4, pp. 2-7, Jan., 1989.

[5] G. Hua, C. Leu, and F. C. Lee, "Novel zero-voltage-transition PWM converters," IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., pp. 56-61, 1992.
 [6] 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.
 [7] R. C. Fuentes and H. L. Hey, "An improved ZCS-PWM commutation cell for IGBT's applications," IEEE Applied Power Electron. Conf., pp. 805-810, 1997.
 [8] H. Mao, F. C. Lee, X. Zhou, H. Dai, M. Cosan, and D. Boroyevich, "Improved zero-current transition converters for high-power applications," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 33, pp. 1220-1232, Sept./Oct., 1997.
 [9] C. M. O. Stein and H. L. Hey, "A true ZCZVT commutation cell for PWM converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, no. 1, pp. 185-193, 2000.
 [10] 마근수, 김양모, "손실을 최소화한 새로운 영전류 스위칭 방식의 PWM 컨버터", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1193-1195, 2000.

저 자 소 개

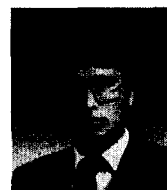


마근수 (馬根洙)

1967년 9월 14일 생. 1990년 충남대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 박사과정수료. 1994년~현재 한국항공우주연구원 선임연구원.

Tel : 042-860-2437

E-mail : ksma@kari.re.kr



김양모 (金良模)

1950년 3월 29일 생. 1973년 서울대 공업교육(전자)학과 졸업. 1975년 동 대학원 공업교육(전자)학과 졸업(석사). 1986년 일본 동경대 전자공학과 졸업(공학). 1990년 미국 버지니아테크 방문교수. 1979년~

현재 충남대 전기공학과 교수.

Tel : 042-821-5657

E-mail : ymkim@ee.chungnam.ac.kr