

배터리 충전을 위한 새로운 AC/DC 컨버터의 모드해석

김태근, 정교범
 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부

Analysis of New AC/DC Converter for Battery Charging

Tae-Keun Kim, Gyo-Bum Chung
 Hongik University

Abstract - 본 연구는 출력단에 캐패시터를 갖고 있는 AC 전류원으로부터, 배터리 충전을 위한 새로운 AC/DC 컨버터 회로를 제안한다. 영전압과 영전류 스위칭을 사용하여 컨버터의 소형화 및 고효율화를 추구하고, 풀브리지 MOSFET 정류기와 Buck-boost 컨버터가 결합된 새로운 토폴로지의 회로를 구성하였다. 제안된 컨버터의 동작원리 및 동작모드를 해석하고, PSpice 시뮬레이션을 통해 해석결과를 검증하였다

1. 서 론

최근 전기전자제품은 반도체사 및 기관 등의 소형·집적화에 따라 소형·경량화 되고 있으며, 이 회로들은 주로 배터리를 에너지원으로 사용하고 있다. 따라서 충전장치를 통한 주기적인 에너지 공급을 필요로 한다.^[1,2,3]

저전력 소용량 분야에서는 무선(wireless) 전력공급을 위한 새로운 방안으로 소음 및 기계적인 진동에 의한 공명기의 진동과 압전소자를 이용하여 전원을 공급하고자 하는 노력이 시도되고 있다.^[4]

그러나, 소음, 진동 등의 에너지 발생원들은 출력 전압이 매우 작다. 저전압 분야에서는 순방향 전압강하에 의한 스위칭 손실을 개선하기 위해서 MOSFET이 다이오드를 대신하고 있다. 또한 공진회로를 이용한 영전압, 영전류 스위칭을 채택하여 컨버터 효율을 개선하고 있다.

본 연구는 저전압 AC 전류원으로부터, 소형 무선 시스템에 에너지를 공급하는 배터리를 충전하기 위해서, MOSFET 4개와 환류다이오드 1개를 사용하여, 영전압, 영전류 스위칭을 채택한 새로운 형태의 AC/DC 컨버터를 제안한다.

2. 동작모드의 해석

2.1 토폴로지

그림 1은 저전압 AC 전류원으로부터 배터리를 충전하는 AC/DC 컨버터의 토폴로지이다. 풀브리지 MOSFET 정류기와 Buck-boost 컨버터 혼합 형태의 AC/DC 컨버터로 구성되었다.

전류원 I_s 는 출력단의 캐패시터 C_c 를 충전시키며, 전압 $V_{ab}(t)$ 가 형성된다. MOSFET S_{R1} 과 S_{R2} 는 전압 $V_{ab}(t)$ 가 영전압일 때, 극성에 따라 스위칭한다. MOSFET 스위치 S_{R1} 이 턴온 상태에서, 전압 $V_{ab}(t)$ 가 최대값일 때, MOSFET 스위치 S_{P1} 이 턴온하여, LC 공진회로를 구성한다. 이 때 캐패시터 C_c 에 저장된 에너지가 인덕터 L로 전달된다. 인덕터 L에 저장된 에너지가 최대값을 가질 때, 전압 $V_{ab}(t)$ 는 영전압 값을 가지게 되며, MOSFET 스위치 S_{P1} 이 턴오프하여, 인덕터 에너지는 환류다이오드 D를 통해 배터리 V_b 를 충전시킨다.

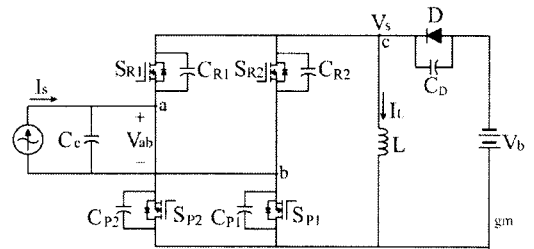


그림 1. 저전압 AC전류원으로부터 배터리 충전을 위한 새로운 AC/DC 컨버터 회로

2.2 동작모드

동작모드 해석을 위하여, MOSFET은 이상적 스위치, 병렬연결된 기생캐패시터 및 0.7[V]에서 턴온되는 바나다이오드로 모델링하였다. 다이오드는 0.7[V]에서 턴온되는 이상적인 다이오드와 병렬연결된 기생캐패시터로 모델링하였다.

그림 2는 AC/DC 컨버터 회로내의 각 동작모드에서의 활성부분을 보인다.

모드 1 : ($t_0 - t_1$) 저전압 AC 전류원의 출력 캐패시터 C_c 가 충전되는 구간이다. 출력캐패시터 전압은 최대 V_p 까지 충전되며 이 때 저주파 AC 전류원의 출력 전류 I_s 의 크기는 영전류 값을 갖는다. 풀브리지 MOSFET 정류기의 S_{R1} 은 턴온상태이다.

모드 2 : ($t_1 - t_2$) MOSFET 스위치 S_{P1} 이 턴오프 상태에서 턴온상태로 전환되는 구간이다. S_{P1} 의 드레인-소스 사이의 기생캐패시터 C_{P1} 이 방전하는 구간이다.

모드 3 : ($t_2 - t_3$) MOSFET 스위치 S_{P1} 이 턴온상태가 되고, 출력 캐패시터 C_c 에 저장되어 있던 에너지가 인덕터 L로 전달된다.

모드 4 : ($t_3 - t_4$) MOSFET 스위치 S_{P1} 이 턴오프되는 과정에서, 인덕터 전류 I_L 이 MOSFET S_{P1} 의 기생캐패시터 C_{P1} 과 다이오드 기생 캐패시터 C_D 에 분배된다. 다이오드 기생캐패시터 C_D 가 분배된 인덕터 전류에 의해서 다이오드 턴온전압 0.7[V]까지 충전된다. 이후 MOSFET 스위치 S_{P1} 의 기생캐패시터 C_D 에 흐르는 전류가 0[A]로, 다이오드전류의 크기가 인덕터 전류의 크기와 같아지게 된다.

모드 5 : ($t_4 - t_5$) 인덕터에 저장된 에너지가 배터리로 전달되는 충전기간이다. 이 모드는 인덕터 전류가 0[A] 될 때까지 지속된다.

모드 6 : ($t_5 - t_6$) MOSFET 스위치 S_{P1} 및 다이오드의 기생 캐패시터 C_D 와 인덕터 L에 의해 고주파 공진

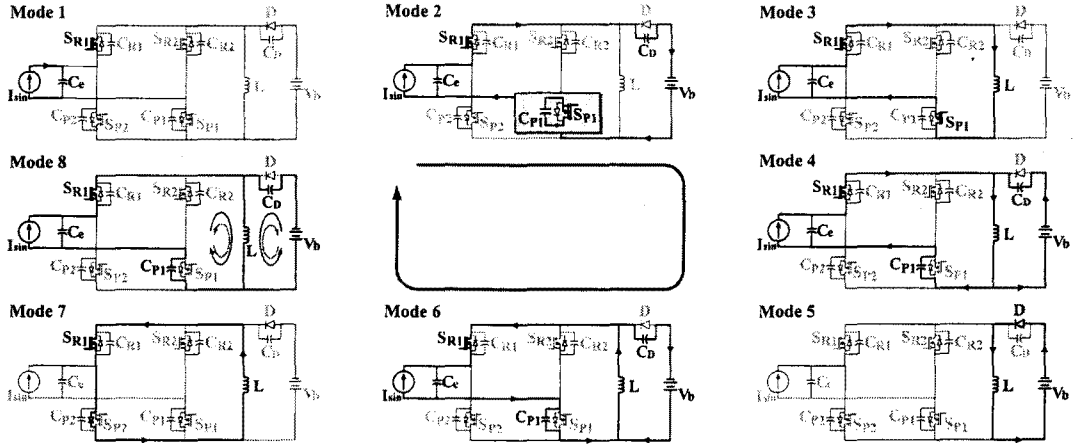


그림 2. AC/DC 컨버터 동작모드

이 이루어지며, 이 모드는 MOSFET 스위치 S_{P2} 의 바디 다이오드가 턴온될 때까지 지속된다.
 모드 7 : ($t_6 - t_7$) MOSFET 스위치 S_{P2} 의 바디다이오드가 턴온된 후에 공진전류가 0[A]될 때까지 지속된다.
 모드 8 : ($t_7 - t_0'$) MOSFET 스위치 S_{P2} 의 바디다이오드가 턴오프된 이후에, MOSFET의 기생캐패시터 C_{P1} 및 다이오드의 기생 캐패시터 C_D 와 인덕터 L 에 의해 고주파 공진이 이루어진다. 이는 S_{R1} 에서 S_{R2} 로 스위칭할 때까지 지속된다.

그림 3은 $\frac{3}{2}T$ 동안의 입력전류 I_s , 캐패시터전압 V_{ab} , 정류된 전압 V_s 및 인덕터 전류 I_L 과 MOSFET 스위치 S_{P1} 의 스위칭 순간에 발생하는 각 모드에서의 인덕터 전류 I_L , MOSFET 스위치 S_{P1} 과 S_{P2} 의 전류 I_{P1} , I_{P2} 및 밧데리에 흐르는 전류 I_b 의 해석파형이다.

2.3 손실계산

각 동작모드에서 발생하는 에너지 손실분 W_{loss} 는 회로내의 각 소자에 존재하는 저항성분에 의한 에너지 손실 $W_{R,n}$ 과, 반도체소자의 턴온 전압에 의한 스위칭 성분 $W_{S,n}$ 에 의한다.

$$W_{loss} = \sum_1^8 (W_{R,n} + W_{S,n})$$

$$= \sum_1^8 \left(\int_{t_{n-1}}^{t_n} i_n^2(t) R_n dt + \int_{t_{n-1}}^t V_n i_n(t) dt \right)$$

여기서, R_n 은 모드 n 에서의 저항성분이고, V_n 은 모드 n 에서의 턴온 전압강하분이다.

2.4 밧데리 충전조건

저전압 AC 전류원의 출력 캐패시터에 저장된 에너지 W_C 와 에너지 손실 W_{loss} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_C = \frac{1}{2} C_c V_{ab}^2(t), \quad W_{loss} = \sum_1^8 (W_{R,n} + W_{S,n})$$

밧데리 충전을 위한 조건으로 $W_C > W_{loss}$ 가 되어야 한다.

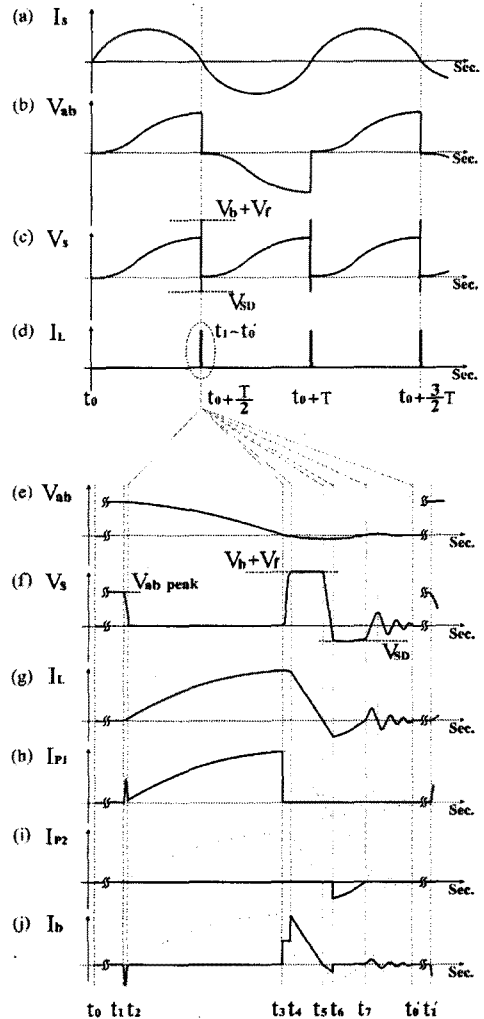


그림 3. AC/DC 컨버터의 전압/전류 파형

(a) 입력전류 (b) 입력캐패시터전압 (c) 정류전압 (d) 인덕터 전류 (e) 입력캐패시터전압(확대) (f) 정류전압(확대) (g) 인덕터전류(확대) (h) MOSFET 스위치 S_{P1} 전류 (확대) (i) MOSFET 스위치 S_{P2} 전류 (확대) (j) 밧데리 전류 (확대)

3. 출력제어

제안된 AC/DC 컨버터 시스템의 제어기는, 저주파 AC 전류원의 출력 캐패시터 C_e 의 전압 $V_{ab}(t)$ 를 계측하여, S_{R1} 과 S_{R2} 를 영전압 및 영전류에서 스위칭하고, 최대전압 V_p 에서 MOSFET S_{P1} 과 S_{P2} 의 스위칭을 위한 피크전압 센서와 영전압 센서가 필요하다. 또한 제어기는, 컨버터가 동작하여 배터리를 충전할 수 있는 충분한 에너지가 전류원 출력 캐패시터 C_e 에 저장되어 있는지를 판단할 수 있어야 한다.

그림 4는 AC/DC 컨버터 시스템 컨트롤러의 흐름도를 보인다.

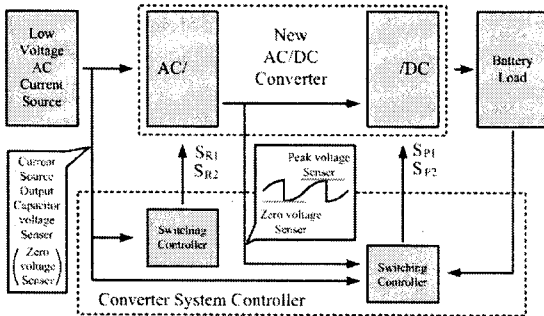


그림 4. AC/DC 컨버터 시스템 컨트롤러의 흐름도

4. 시뮬레이션

컨버터의 동작 모드 해석을 검증하기 위해서, PSpice 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 AC/DC 컨버터 시스템의 데이터이다.

표 1. 저전압 AC 전류원으로부터 배터리 충전을 위한 AC/DC 컨버터 시스템 데이터

I_s	4 μ A	f_{AC}	3124 Hz
L	1 μ H	V_b	2 V
C_e	582.6 pF	Duty	0.025 %
MOSFET	BSS83	Diode	1N4376

그림 5는 약 한주기동안의 입력전류 I_s , 캐패시터전압 V_{ab} , 정류된 전압 V_s 및 인덕터 전류 I_L 을 나타낸다. 동작모드를 상세히 보기위해 구간확대를 하여 MOSFET 스위치 S_{P1} 의 스위칭 순간에 발생하는 각 모드에서의 인덕터 전류 I_L , MOSFET 스위치 S_{P1} 및 S_{P2} 의 전류 I_{P1} , I_{P2} , 배터리에 흐르는 전류 I_b 를 나타내었다. MOSFET S_{P1} 의 스위칭과 관련하여 8개의 동작모드가 존재함을 보인다.

배터리에는 모드 4, 5의 $[t_3 \sim t_5]$ 기간에는 충전전류가, 모드 2의 $[t_1 \sim t_2]$ 기간 및 모드 6의 $[t_5 \sim t_6]$ 기간에는 방전전류가 흐른다. 모드 2, 모드 4, 모드 6 및 모드 8의 지속시간은 MOSFET과 다이오드의 기생캐패시터의 영향을 받는다.

5. 결 론

본 연구는, 저전압 AC 전류원으로부터, 배터리를 충전하는 새로운 형태의 AC/DC 전력변환기를 제시하고, 동작원리를 해석하였다. 새로운 AC/DC 전력변환기는 AC전류원의 반주기마다 8개의 동작모드가 존재하며, PSpice 시뮬레이션에 의해 검증하였다.

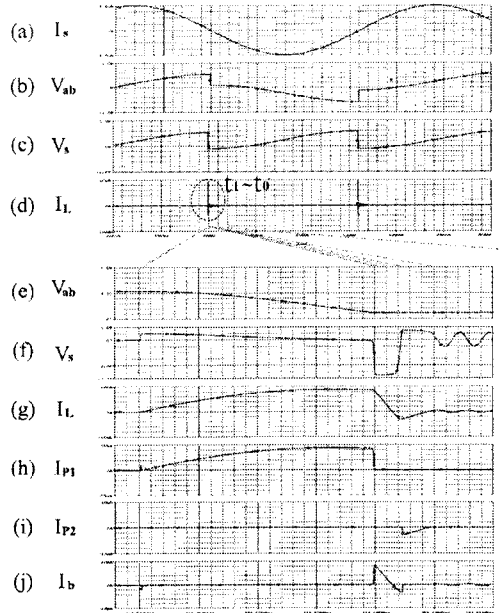


그림 5. AC/DC 컨버터의 시뮬레이션 전압/전류 파형

(a) 입력전류 (b) 입력캐패시터전압 (c) 정류전압 (d) 인덕터 전류 (e) 입력캐패시터전압(확대) (f) 정류전압(확대) (g) 인덕터전류 (확대) (h) MOSFET 스위치 S_{P1} 전류 (확대) (i) MOSFET 스위치 S_{P2} 전류 (확대) (j) 배터리 전류 (확대)

MOSFET과 다이오드의 기생정전용량은, 개별 동작모드의 지속시간에 영향을 주며, 결과적으로 AC 전류원로부터 DC 배터리로 전달되는 에너지 효율에 영향을 미친다.

[참 고 문 헌]

- [1] N.K. Poon, B.M.H. Pong, C.K. Tse, "A constant-power battery charger with inherent soft switching and power factor correction," IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 18, Issue: 6, Nov. 2003, Pages:1262 - 1269
- [2] N.H. Kutkut, D.M. Divan, D.W. Novotny, R.H. Marion, "Design considerations and topology selection for a 120-kW IGBT converter for EV fast charging," IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 13, Issue: 1, Jan. 1998, Pages:169 - 178
- [3] J. Hirai, Tae-Woong Kim, A. Kawamura, "Study on intelligent battery charging using inductive transmission of power and information," IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 15, Issue: 2, March 2000, Pages:335 - 345
- [4] G.K. Ottman, H.F. Hofmann, A.C. Bhatt, G.A. Lesieutre, "Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply," Power Electronics, IEEE Transactions on, Volume: 17, Issue: 5, Sept. 2002, Pages:669 - 676