

저전압 AC 전류원을 이용한 배터리 충전회로의 모드해석

김태근, 정교범
홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부

Analysis of Battery Charger from Low-Voltage AC Current Source

Tae-Keun Kim, Gyo-Bum Chung
Hongik University

ABSTRACT

본 연구는 저전압 AC 전류원으로부터 배터리 충전을 위한 에너지 변환회로를 제안한다. 전체 시스템의 소형화 및 고효율화를 추구하기 위해서, 풀브리지 MOSFET 정류기와 부스트 컨버터로 회로를 구성하였다. 제안된 컨버터 시스템의 동작원리 및 동작모드를 해석하고, 시뮬레이션을 통해 해석결과를 검증하였다.

1. 서 론

최근 콘덴서, 압전재료를 이용한 소자, 반도체소자 및 기관 등의 소형·집적화를 통해 전기전자제품의 소형·경량화가 급속히 진행되고 있으며, 이들 회로는 주로 배터리를 이용하여 에너지를 공급받는다. 따라서 충전장치를 통해서 주기적인 에너지 공급이 필요하다.^[1,2,3] 저전력 소용량 분야에서는 무선(wireless) 전력공급을 위하여 시스템 주변의 수압변화, 온도차, 소음 또는 진동을 이용할 수 있다. 특히 소음 및 기계적인 진동에 의한 공명기의 진동과 압전소자를 이용하여 전원을 공급하고자 하는 노력이 시도되고 있다.^[4]

그러나, 이들 시스템에서 소음, 진동 등의 에너지 발생원들은 시간에 따라 불규칙적으로 변화하고, 에너지원으로부터 이용가능한 전력을 발생시키는 마이크로 발전기는 비선형적인 입·출력 특성을 보일 뿐만 아니라, 출력용량이 매우 작다. 따라서 부하에 전력을 충분히 공급하기 위해서는, 비선형 전력 발생원의 최대 출력점에서 동작할 필요가 있으며, 전력변환장치의 손실도 최소화해야 효율적으로 에너지를 배터리에 충전할 수 있다.^[5-7]

본 연구는 저전압 AC 전류원으로부터, 소형 무선 시스템에 에너지를 공급하는 배터리를 충전하기 위한, 소형 스위치 모드 전력변환장치에 대한 연구를 수행한다.

2. 동작모드 해석

2.1 토폴로지

그림 1은 저전압 AC 전류원으로부터 배터리를 충전하는 AC/DC 컨버터의 토폴로지이다. 풀브리지 MOSFET 정류기와 부스트 DC/DC 컨버터로 구성되었다. 또한 MOSFET과 다이오드의 기생캐패시턴스 및 전류원의 출력 캐패시턴스가 포함되었다. 전류원 출력단의 전압 $V_{ab}(t)$ 가 최대값일 때, MOSFET 스위치 S_{MOS} 가 턴온하여, LC_e 공진회로를 구성하고, 캐패시터 C_e 에 저장된 에너지가 인덕터 L 로 전달된다. 인덕터 L 에 저장된 에너지가 최대값을 가질 때, S_{MOS} 는 턴오프하며, 에너지는 배터리 V_b 를 충전시킨다.

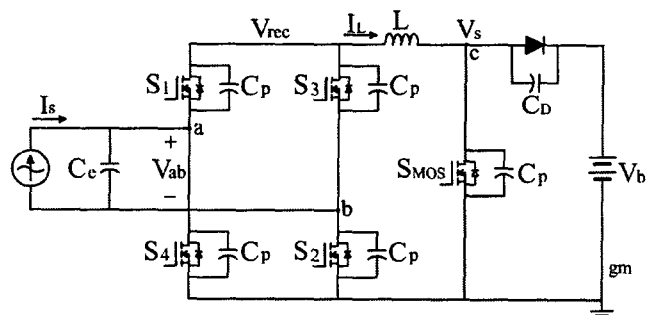


그림 1 저전압 AC 전류원으로부터 배터리 충전을 위한 AC/DC 컨버터 회로

Fig. 1 Topology of AC/DC Converter for charging the battery from a low Voltage AC current source.

2.2 동작모드

동작모드 해석을 위하여, MOSFET은 이상적 스위치, 스위칭 소자에 병렬연결된 기생캐패시터 및 0.7[V]에서 턴온되는 역방향다이오드로 모델링하였으며, 다이오드는 0.7[V]에서 턴온되는 이상적인 다이오드와 병렬연결된 캐패시터로 모델링하였다.

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

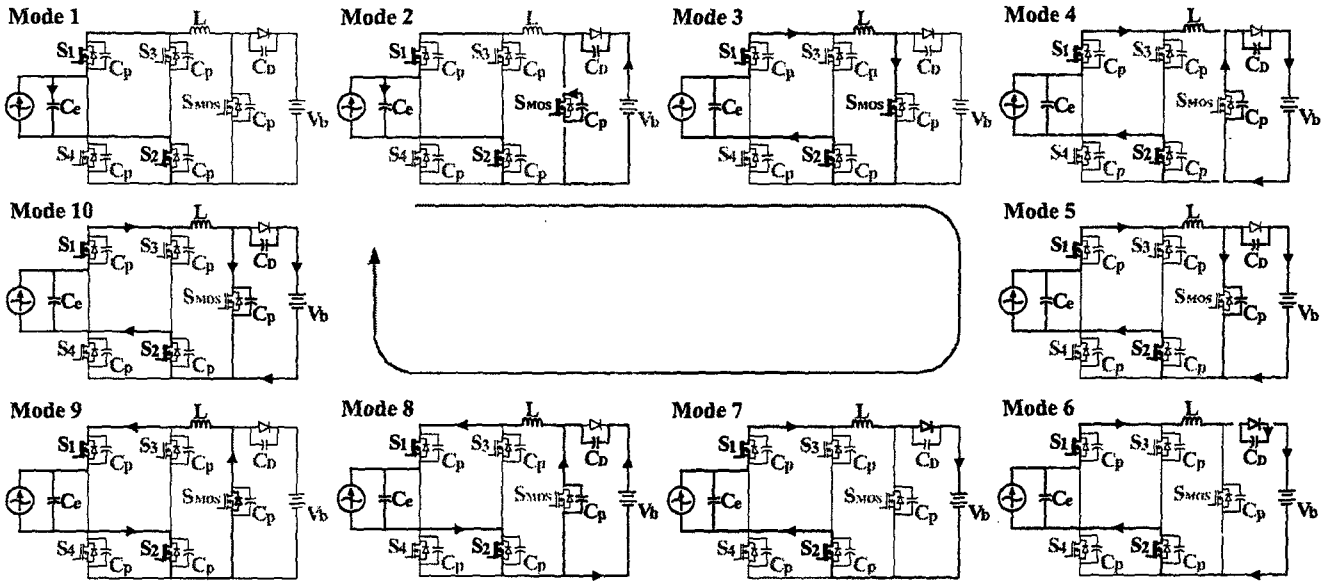


그림 2 AC/DC 컨버터 동작모드.
Fig. 2 Operational modes of AC/DC Converter.

모드 1 : ($t_0 - t_1$) 저전압 AC 전류원의 출력 캐패시터 C_e 가 충전되는 구간이다. 출력캐패시터 전압은 최대 V_p 까지 충전되며 이 때 저주파 AC 전류원의 출력 전류 I_s 의 크기는 영점을 지난다. 풀브리지 MOSFET 정류기의 S_1 과 S_4 는 턴온상태이다.

모드 2 : ($t_1 - t_2$) MOSFET 스위치가 턴오프 상태에서 턴온상태로 전환되는 시간이다. MOSFET S_{MOS} 의 드레인-소스사이의 기생캐패시터 C_p 가 방전하는 시간이다.

모드 3 : ($t_2 - t_3$) MOSFET 스위치가 턴온되고 출력 캐패시터 C_e 에 저장되어 있던 에너지가 인덕터 L 로 전달된다.

모드 4 : ($t_3 - t_4$) MOSFET 스위치가 턴오프되는 과정에서, 인덕터 전류 I_L 이 MOSFET 기생캐패시터 C_p 와 다이오드 기생 캐패시터 C_D 에 분배되는 시간이다.

모드 5 : ($t_4 - t_5$) 다이오드 기생캐패시터 C_D 가 분배된 인덕터 전류에 의해서 다이오드 턴온전압 0.7[V]까지 충전되는 시간이다.

모드 6 : ($t_5 - t_6$) MOSFET 기생캐패시터 C_p 에 흐르는 전류가 0[A]로, 다이오드전류의 크기가 인덕터 전류의 크기와 같아지는 시간이다.

모드 7 : ($t_6 - t_7$) 인덕터에 저장된 에너지가 배터리로 전달되는 충전시간이다. 이 모드는 인덕터 전류가 0[A] 될 때까지 지속된다.

모드 8 : ($t_7 - t_8$) MOSFET 및 다이오드의 기생 캐패시터와 인덕터에 의해 고주파 공진이 이루어지며, 이 때 MOSFET S_{MOS} 의 드레인-소스 사이의 기생캐패시터 C_p 가 충전된다. 이 모드는 MOSFET 역방향 다이오드가 턴온될 때까지 지속된다.

모드 9 : ($t_8 - t_9$) MOSFET 역방향 다이오드가 턴온된 후에 공진전류가 0[A]될 때까지 지속된다.

모드 10 : ($t_9 - t_0$) MOSFET Body 다이오드가 턴오프

된 이후에, MOSFET 및 다이오드의 기생 캐패시터와 인덕터에 의해 고주파 공진이 이루어진다. 풀브리지 MOSFET 정류기가 (S_1, S_2)에서 (S_3, S_4)로 스위칭할 때까지 지속된다.

그림 3은 MOSFET S_{MOS} 의 스위칭 순간에 발생하는 각 모드에서 인덕터, MOSFET 스위치 및 배터리에 흐르는 전류의 해석파형이다.

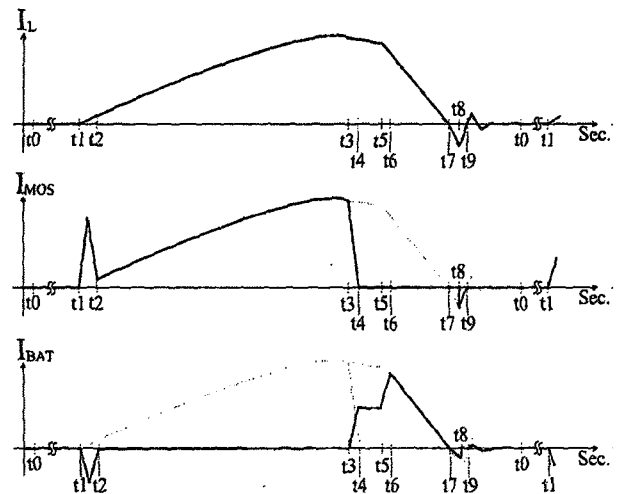


그림 3 AC/DC 컨버터의 전류 파형.
Fig. 3 Current Waveforms of AC/DC Converter.

2.3 손실계산

각 동작모드에서 발생하는 에너지 손실분 $W_{L,n}$ 은, 회로내의 각 소자에 존재하는 저항성분에 의한 에너지 손실 $W_{R,n}$ 과, 반도체소자의 턴온 전압에 의한 스위칭 성분

$W_{S,n}$ 에 의한다.

$$W_{R,n} = \int_{t_{(n-1)}}^{t_n} i_n^2(t) \cdot R_n \cdot dt$$

$$W_{S,n} = \int_{t_{n-1}}^{t_n} V_m \cdot i_n(t) \cdot dt$$

손실계산을 위해서 각 모드의 초기조건과 최종조건을 만족하는 비선형 전압·전류 방정식의 해를 구해야한다.

2.4 배터리 충전조건

저전압 AC 전류원의 출력 캐패시터에 저장된 에너지 W_C 는 식 (5)과 같다.

$$W_C = \frac{1}{2} C_o V_p^2$$

AC/DC 변환과정에 존재하는 각 운전 모드에서 발생한 손실 에너지 W_L 은 식 (6)과 같다.

$$W_L = \sum_1^{10} (W_{Rn} + W_{Sn})$$

배터리 충전을 위해서 식 (7)을 만족해야한다.

$$W_C > W_L$$

3. 출력 제어

AC/DC 컨버터 시스템을 이용한 배터리 충전을 위한 제어기는 풀브리지 MOSFET 정류기의 스위칭회로와 부스트 컨버터 S_{MOS} 의 스위칭 회로가 필요하다. 컨버터 시스템의 제어기는, 저주파 AC 전류원의 출력 캐패시터 C_e 의 전압을 계측하여 AC/DC MOSFET 정류기를 스위칭하고, 최대전압 V_p 에서 DC/DC 컨버터의 MOSFET 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.

4. 시뮬레이션

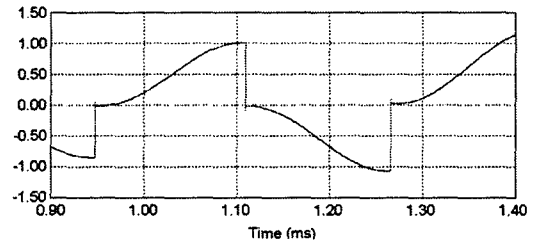
컨버터의 동작 모드 해석을 검증하기 위해서, PSIM 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 AC/DC 컨버터 시스템의 데이터이다.

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

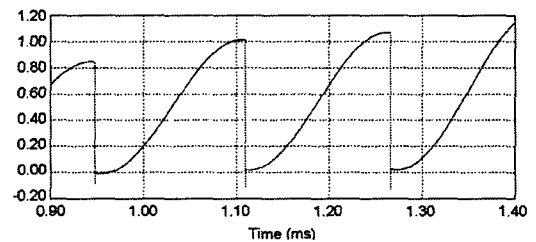
Table 1 Data of AC/DC converter for charging the battery from a low frequency AC current source.

I_p	4 μ A	f_{AC}	3124 Hz
L	1 μ H	V_b	2 V
C_e	582.6 pF	C_D	3 pF
C_e	3 pF	Duty	0.025 %

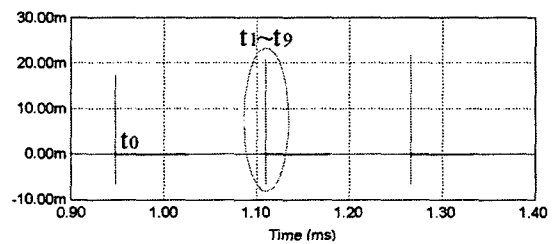
그림 4는 AC/DC 컨버터의 동작과 관련하여 회로내의 전류원의 출력단 캐패시터 전압 V_{ab} , 정류기 전압 V_{rec} , MOSFET S_{MOS} 전류이다.



(a)



(b)



(c)

그림 4 AC/DC 컨버터의 시뮬레이션 전류 파형.(a) 인덕터전류 (b) MOSFET 스위치 전류 (c) 배터리전류

Fig. 4 Simulated Current Waveforms of AC/DC Converter (a) Inductor current (b) MOSFET switch current (c) Battery current

그림5는 인덕터, MOSFET 드레인 및 배터리 충전 전류 파형이며, 동작모드를 상세하게 관측하기 위해서 그림 4 (c)의 $[t_1-t_9]$ 구간을 확대하였다. MOSFET S_{MOS} 의 스위칭과 관련하여 10개의 동작모드가 존재함을 보인다.

참고 문헌

- [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
- [5] R. Oruganti, M. Palaniapan, "Inductor voltage control of buck-type single-phase AC-DC converter," IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 15 , Issue: 2 , March 2000, Pages:411 - 416
- [6] M. Tou, K. Al-Haddad, G. Olivier, V. Rajagopalan, "Analysis and design of single-controlled switch three-phase rectifier with unity power factor and sinusoidal input current," IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 12 , Issue: 4 , July 1997, Pages:608 - 614
- [7] Hyun Chil Choi, Myung Joong Youn, "A soft-switched, high-frequency resonant rectifier and characteristics of the controlled system," IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 12 , Issue: 1 , Jan. 1997, Pages:161 - 172

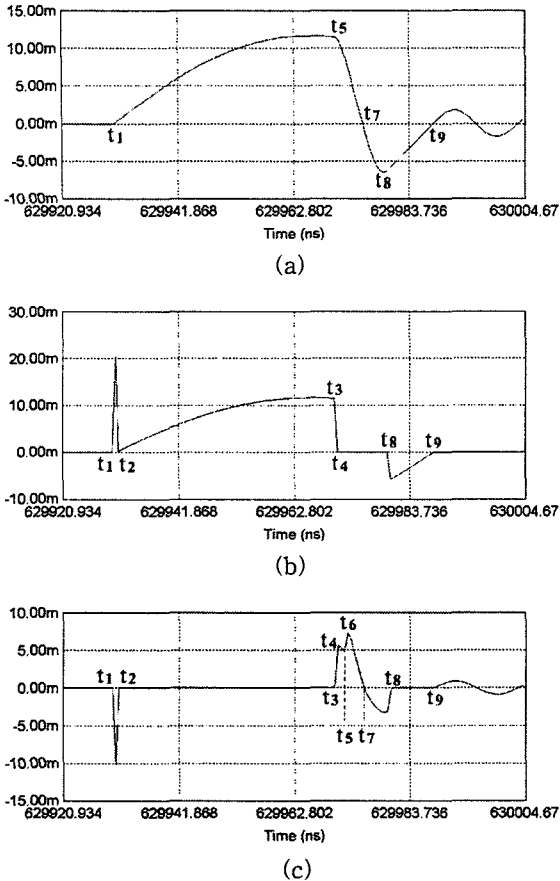


그림 5 AC/DC 컨버터의 시뮬레이션 전류 파형.(a) 인덕터전류 (b) MOSFET 스위치 전류 (c) 배터리전류
Fig. 5 Simulated Current Waveforms of AC/DC Converter (a) Inductor current (b) MOSFET switch current (c) Battery current

배터리에 모드 4, 5, 6, 7의 $[t_3 - t_7]$ 기간에는 충전전류가, 모드 2의 $[t_1 - t_2]$ 기간 및 모드 8의 $[t_7 - t_8]$ 기간에는 방전전류가 흐른다. 모드1, 모드 4, 모드 5, 모드 6 및 모드 8은 MOSFET과 다이오드는 기생 캐패시터의 영향을 받는다.

5. 결론

본 연구는, 출력 캐패시턴스가 저전압 AC 전류원으로부터, 배터리를 충전하는 AC/DC 전력변환기의 운전모드 해석을 수행하였다. AC/DC 전력변환기는 AC전류원의 반주기마다 10개의 동작모드가 존재하며, 시뮬레이션에 의해 검증하였다.

MOSFET과 다이오드의 기생정전용량은, 개별 동작모드의 지속시간과 AC 전원에서부터 DC 배터리로 전달되는 에너지에 영향을 미친다. 배터리 충전을 위한 운전조건이 제시되었다.