

Cuk 컨버터를 이용한 휴대용 연료전지 충전기의 개발

김태훈, 이승준, 최우진
 송실대학교 전기공학부

Development of the Portable Fuel Cell Charger Using Cuk Converter

Tae-Hoon Kim, Woojin Choi

Department of Electrical Engineering, Soongsil University

ABSTRACT

본 논문에서는 소형 PEM(Proton Exchange Membrane) 연료전지를 이용하는 충전기에 대해 서술한다. 기존에 개발된 대부분의 충전기는 On-Grid 방식으로 벽타입 컨버터를 이용한 감압 충전방식을 사용하였으나, 연료전지를 이용할 경우 승압식 컨버터를 통해 배터리를 충전하여야 한다. 그러나 승압형 컨버터의 출력단에 인덕터가 없는 경우 큰 리플전류를 유도하게 되며, 이는 시스템의 효율 및 배터리의 수명에 좋지 않은 영향을 끼치게 된다. 본 논문에서는 Cuk 컨버터를 이용하는 충전용 전력변환기의 제어방법에 대해 제안하고 그 타당성을 검증하였다.

1. 서론

휴대용 전자기기들의 소비전력 증가에 따라 2차전지에 비해 에너지 밀도가 높은 연료전지를 이용한 충전기의 필요성이 부각되고 있다. 대다수의 충전기는 On-Grid 방식으로 벽타입 컨버터를 이용한 감압 방식이었으나, 연료전지를 이용할 경우 승압식 컨버터를 통한 배터리의 충전이 요구된다. 또한 배터리는 일반 저장부하와 달리 큰 커패시턴스 성분을 가지고 있기 때문에 컨버터의 출력단에 인덕터가 없는 경우 큰 출력 리플전류를 유도하게 되어 시스템의 효율과 배터리의 수명에 좋지 않은 영향을 끼치게 된다. 또한 이를 해결하기 위해 절연형 감압 컨버터를 사용하는 경우 변압기 사용에 의한 부피 증가와 부가 소자의 사용에 따른 가격 상승을 피하기 어렵다. Cuk 컨버터는 주스위치의 ON/OFF 동작에 관계없이 출력으로 에너지가 항상 전달되며, 이상적으로 리플이 거의 존재하지 않아 충전용으로 적합하다. 또한, 승압 및 감압이 자유롭기 때문에 배터리의 정격전압에 상관없는 범용 충전기의 설계도 가능하다. 따라서 본 논문에서는 Cuk 컨버터를 이용하여 배터리 충전기를 설계하고, 그의 상태공간 모델링, 주파수 특성 해석 및 제어기 설계에 대해 기술한다. 제안된 제어 방식은 시뮬레이션을 통한 배터리의 CC/CV 모드 충전을 통해 검증된다.

2. Cuk 컨버터를 이용한 충전기 설계

2.1 Cuk 컨버터의 모델링

Cuk 컨버터의 소신호 교류 모델 상태방정식은 상태공간 평면화법을 이용하여 동적 모델링을 수행함으로써 식(1)과 같이

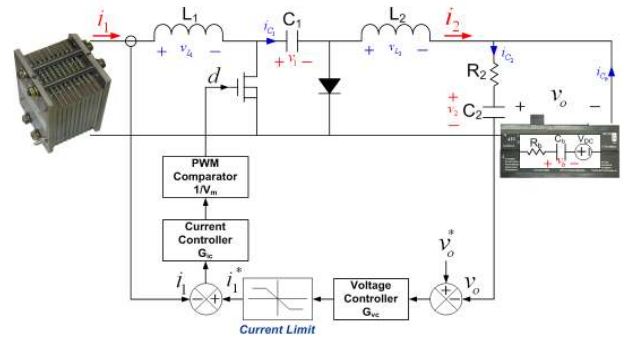


그림 1 연료전지를 이용하는 충전기 및 제어 알고리즘 블록도
 Fig. 1 Fuel Cell Powered Charger and the Block Diagram of its Control Algorithm

구할 수 있다^[1]. 이때 입력 전압 및 배터리 전압의 변화는 없다고 가정한다.

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} \Big|_{\hat{v}_i(t)=0, \hat{v}_b(t)=0} = \begin{bmatrix} 0 & -D/L_1 & 0 & 0 & 0 \\ D/C_1 & 0 & D/C_1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2R_2+R_b}{L_2(R_2+R_b)}D & \frac{R_2R_b}{L_2(R_2+R_b)} & \frac{R_b}{L_2(R_2+R_b)} & \frac{R_2}{L_2(R_2+R_b)} \\ 0 & 0 & \frac{R_b}{C_2(R_2+R_b)} & \frac{1}{C_2(R_2+R_b)} & \frac{1}{C_2(R_2+R_b)} \\ 0 & 0 & \frac{R_b}{C_b(R_2+R_b)} & \frac{1}{C_b(R_2+R_b)} & \frac{1}{C_b(R_2+R_b)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_1(t) \\ \hat{v}_1(t) \\ \hat{i}_2(t) \\ \hat{v}_2(t) \\ \hat{v}_b(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_i/L_1 & (I_2 - I_1)/C_1 & -\frac{2R_2+R_b}{L_2(R_2+R_b)}V_i & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \hat{d}(t)$$

$$y = C \begin{bmatrix} \hat{i}_1(t) & \hat{v}_1(t) & \hat{i}_2(t) & \hat{v}_2(t) & \hat{v}_b(t) \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 스위치의 시비율에 대한 입력전류 및 출력전압의 제어 전달 함수를 각각 유도할 수 있으며 이는 식 (2) 및 (3)과 같다.

$$G_{id}(s) = \frac{96699s^4 + 1.15 \times 10^{11}s^3 + 4.61 \times 10^{12}s^2 + 6.1 \times 10^{16}s + 8.94 \times 10^{11}}{s^5 + 1.19 \times 10^6s^4 + 32.5 \times 10^6s^3 + 5.19 \times 10^{11}s^2 + 1.97 \times 10^{12}s + 4.47 \times 10^{10}} \quad (2)$$

$$G_{vd}(s) = \frac{844.3s^4 + 1.21 \times 10^9s^3 - 3.7 \times 10^{10}s^2 + 2.52 \times 10^{14}s + 5.73 \times 10^{12}}{s^5 + 1.19 \times 10^6s^4 + 32.5 \times 10^6s^3 + 5.19 \times 10^{11}s^2 + 1.97 \times 10^{12}s + 4.47 \times 10^{10}} \quad (3)$$

2.2 이중 루프 제어기의 설계

그림 1은 이중 제어 루프를 이용한 Cuk 컨버터의 블록 다이

어그램이다. 컨버터의 출력전압을 제어(CV Mode)하기 위한 외부 제어 루프와 입력전류를 제어(CC Mode)하기 위한 내부 제어 루프로 구성되어 있다. 출력전압(v_o)을 검출하여 기준 전압(v_o^*)과 비교한 뒤 오차신호를 만들며, 이 오차신호는 전압 제어기에 인가되어 PI제어기를 거쳐 전류제어기의 기준 전류(i_1^*)를 만든다. 이때 배터리는 최초 정전류 모드로 충전되어야 하므로 컨버터의 기준전류는 배터리의 충전전류 값으로 제한되어야 한다. 기준 전류는 입력 전류(i_1)와 비교되어 오차를 생성하여 보상기로 전송하고, 비교기는 보상기의 출력과 삼각파를 비교하여 주스위치의 구동을 위한 펄스 파형을 출력한다. 이때 내부 전류 루프 및 외부 전압 루프의 폐회로 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[2].

$$T_i(s) = G_{ic} \times 1/V_m \times G_{id} \quad (4)$$

$$T_v(s) = \frac{G_{vc} \times G_{ic} \times 1/V_m \times G_{vd}}{1 + T_i} \quad (5)$$

2.2.1 내부 루프에 의한 입력전류 제어기 설계

그림 2(a)는 Cuk 컨버터의 입력전류 제어 전달함수를 이용한 보상기 설계를 Matlab을 통해 수행한 과정을 나타낸다. 교차 주파수는 스위칭 주파수의 1/5인 6kHz로 선정하였으며, 이때 제어전달 함수의 위상은 -90도로 충분한 여유를 확보하고 있지만 배터리의 큰 커패시턴스 성분에 의해 저주파 이득이 낮다. 따라서 2개의 극점과 1개의 영점을 갖는 제어기를 설계하고 원점에 극점을 배치함으로써 저주파 이득을 크게 하였다.

2.2.2 외부 루프에 의한 출력전압 제어기 설계

그림 2(b)는 전압 제어루프 제어기의 설계를 보드선도를 이용하여 수행한 과정이다. 이때 컨버터의 출력전압은 배터리의 양단 전압에 의해 정해지며, 교차주파수는 30Hz로 매우 낮으나 충전 시 부하량이 급변하지 않기 때문에 문제가 없다. 전압 제어기 설계에는 저주파 영역의 루프 이득을 증가시키기 위해 간단한 PI 제어기를 이용하였다.

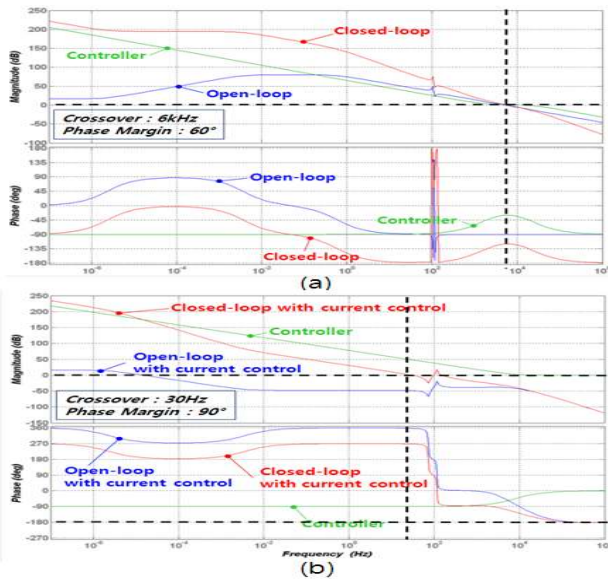


그림 2 제어기 설계 (a) 전류제어 루프 (b) 전압제어 루프
Fig. 2 Design of the Controller (a)Current-loop (b)Voltage-loop

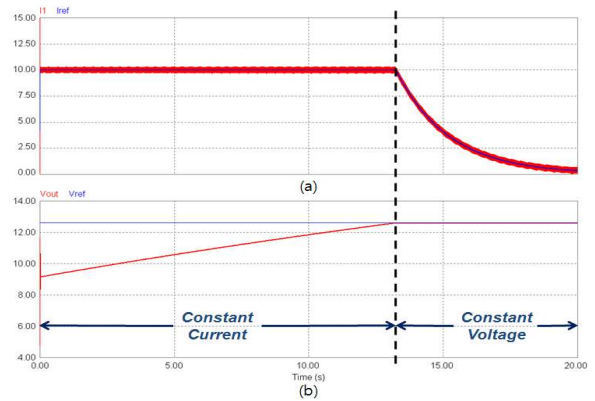


그림 3 CC/CV 모드의 충전기 시뮬레이션
Fig. 3 Simulation of the Charger in the CC/CV Mode

2.3 시뮬레이션

일반적으로 리튬 이온 배터리의 정전류 충전은 보통 1C~3C의 전류로 수행되지만 PSIM 소프트웨어를 사용하여 이를 구현할 경우 상당한 시간이 소요되기 때문에 본 연구에서는 컨버터의 충전동작을 확인함으로써 제안된 충전기 알고리즘의 적절함을 평가하기 위해 10C 전류로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용한 배터리의 충전상한 전압은 12.6[V]이며 방전하한 전압은 9[V]이다. 그림 3은 CC/CV 모드의 충전기 시뮬레이션 결과로서 CC모드의 충전기간 동안 컨버터의 입력전류 파형은 그림 3(a)와 같이 지령 입력전류 값인 10[A]로 제어되며 이때 배터리 전압 파형은 그림 3(b)와 같이 방전하한전압에서 서서히 증가하다가 충전상한전압에 도달하는 것을 알 수 있다. 또한 CV 충전 중 컨버터의 입력전류는 지수 함수적으로 감소하며, 배터리의 전압은 12.6[V]로 일정하게 유지된다.

3. 결론

본 논문에서는 소형 PEM 연료전지를 이용하는 충전기용 Cuk 컨버터의 제어기법에 관해 제안하였다. 제안된 방법은 배터리의 CC/CV 모드 충전을 입력전류 및 출력전압의 이중 제어 루프를 통해 간단하게 구현하였으며, 시뮬레이션을 통해 동작을 검증하였다. 제안된 방법은 연료전지를 이용하는 충전기용 승압식 컨버터의 제어에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대되며, 추후 시스템 구현 및 실험을 실시할 예정이다.

본 과제(연구)는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과임

참고 문헌

[1] D.C. Riawan, C. V. Nayar, "Analysis and Design of a Solar Charger Controller Using Cuk Converter", Proceedings of the AUPEC 2007, pp. 1-6, Dec., 2007.
[2] X. Huang, Xi. Wang, T. Nergaard, J. Lai, X. Xu, L. Zhu, "Parasitic Ringing and Design Issues of Digitally Controlled High Power Interleaved Boost Converters", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 19, NO. 5, Sep., 2004.