

# 연료전지용 양방향 벡-부스트 컨버터 제어기 설계 및 해석

김승욱, 노용수, 현병조, 박준성, 김진홍  
전자부품연구원 지능메카트로닉스 연구센터

## Controller Design and Analysis of Bi-directional Buck-Boost Converter for Fuel-Cell

Seung-Wook Kim, Yong-Su Noh, Byong Jo Hyon, Joon Sung Park, Jin-Hong Kim  
Korea Electronics Technology Institute

### ABSTRACT

본 논문은 연료전지를 이용한 양방향 벡-부스트 시스템의 제어기 설계와 해석을 하고자 한다. 제어기 설계는 주파수응답을 해석하여 제어 루프의 안정성과 성능을 고려하여 설계하였다. 제어기의 게인 값은 시스템의 대역폭과 위상여유를 고려하여 선정하였고, 설계된 제어기는 Matlab과 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 1. 서 론

연료전지용 전력변환시스템의 구성에는 여러 가지 형태가 있다. 그중에서도 양방향 컨버터는 배터리 등의 에너지 저장장치를 통하여 적절한 에너지를 충·방전함으로써 연료전지와 부하 간 전력의 균형을 맞추는 역할을 하게 된다.

본 논문에서는 양방향 DC-DC 컨버터가 안정성과 적절한 성능을 가질 수 있도록 제어기 설계와 해석에 대해서 논하고자 한다. 정확한 해석을 위해 ESR이 포함된 벡-부스트 컨버터의 전달함수를 소신호 등가회로로 모델링하여 구하고, 주파수응답을 통해 시스템의 대역폭과 위상여유를 고려하여 제어기의 게인 값을 구하였다. 주파수응답은 Matlab을 통해 해석하였고, 시스템의 성능은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 2. 본 론

그림 1은 양방향 벡-부스트 컨버터이다. 벡 컨버터 동작 시에는 스위치 SW1은 PWM으로 동작하고 스위치 SW2는 Off 된다. 벡 컨버터는 Two-loop 전압-전류 제어를 통해 충전시킨다. 부스트 컨버터 동작 시에는 반대로 스위치 SW2가 PWM으로 동작하고 스위치 SW1은 Off 된다. 부스트 컨버터는 Single-loop 전류제어를 통해 방전시킨다.

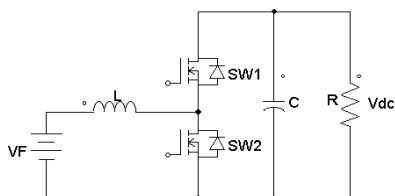


그림 1 양방향 컨버터  
Fig. 1 Bi-directional Converter

### 2.1 모델링

#### 2.1.1 벡 컨버터 모델링

인덕터와 커패시터의 ESR이 포함된 벡 컨버터의 회로를 상태방정식으로 상태 공간 평균식(State space average)에 대입하면 상태 공간 평균식을 구할 수 있다. 소신호 모델로 변환된 상태 공간 평균식을 이용하여 Two-loop 전압-전류 제어기를 설계하기 위한 벡 컨버터의 전달함수를 구하면 식 (1), 식 (2)와 같다.<sup>[1]</sup>

$$G1(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{[(RC+R_cC)s+1]V_{dc}}{(LCR+LCR_c)s^2+(L+RR_LC+R_LR_cC+RR_cC)s+(R+R_L)} \quad (1)$$

$$G2(s) = \frac{\hat{V}_o(s)}{\hat{i}_L(s)} = \frac{RR_cCs+R}{(RC+R_cC)s+1} \quad (2)$$

#### 2.1.2 부스트 컨버터 모델링

ESR이 포함된 부스트 컨버터도 벡 컨버터와 동일하게 상태 공간 평균식을 이용하여 Single-loop 전류 제어기를 설계하기 위한 부스트 컨버터의 전달함수를 구하면 식 (3)과 같다.<sup>[2]</sup>

$$G3(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{[V_{dc}CR+V_{dc}CR_c+(1-D)CRR_L]s+[V_{dc}+(1-D)RL]}{\Delta s^2+[L+CRR_L+CR_LR_c+(1-D)^2CRR_c]s+(1-D)^2R+R_L} \quad (3)$$

여기서  $\Delta = (LCR+LCR_c)$  이다.

### 2.2 제어기 설계

#### 2.2.1 벡 컨버터 Two-loop 전압-전류 제어기

그림 2는 제안된 벡 컨버터 제어기의 블록다이어그램이다. 벡 컨버터의 제어기 설계 목표는 스위칭 주파수와 디지털 신호 지연을 고려하여 전류제어기는 위상여유 80 [deg], fc 2.5[kHz] (15.7k[rad/s]) 선정하였고, 전압제어기는 위상여유 80 [deg], fc 250[Hz] (1.57k[rad/s])로 선정하였다.

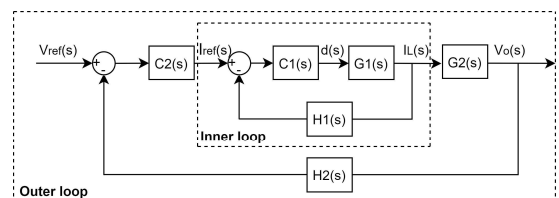


그림 2 벡 컨버터 블록다이어그램  
Fig. 2 Block diagram of buck converter

전류제어기와 전압제어기는 모두 PI 제어기를 사용하였고, 주파수응답을 통해 위상여유와 Cut-off 주파수를 만족하는 게인 값으로 설계하였다. 식 (4),(5)는 설계된 전류,전압 PI 제어기의 전달함수이다. 그림 3은 Outer loop인 벡 컨버터 전압 제어기에 대한 주파수응답이다.

$$C1(s) = \frac{0.0016494(s + 5198)}{s} \quad (4)$$

$$C2(s) = \frac{0.40326(s + 1450)}{s} \quad (5)$$

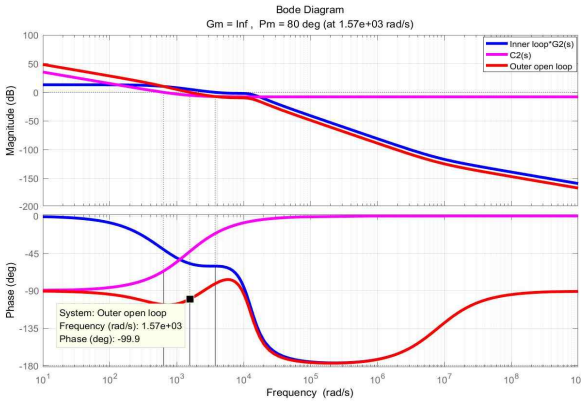


그림 3 벡 컨버터 주파수 응답  
Fig. 3 Frequency response of buck converter

### 2.2.2 부스트 컨버터 Single-loop 전류 제어기

부스트 컨버터 전류 제어기의 블록다이어그램은 벡 컨버터 제어기의 Inner loop 블록다이어그램 형태와 동일하다. 부스트 컨버터의 전류제어기 설계 목표는 위상여유 80 [deg], fc 2.5 [kHz](15.7k[rad/s])로 선정하였다. 전류제어기는 PI 제어기를 사용하였고, 주파수응답을 통해 위상여유와 Cut-off 주파수를 만족하는 게인 값으로 설계하였다. 식 (6)은 설계된 PI 제어기의 전달함수이다. 그림 4는 부스트 컨버터 전류제어기에 대한 주파수응답이다.

$$C3(s) = \frac{0.0022019(s + 2577)}{s} \quad (6)$$

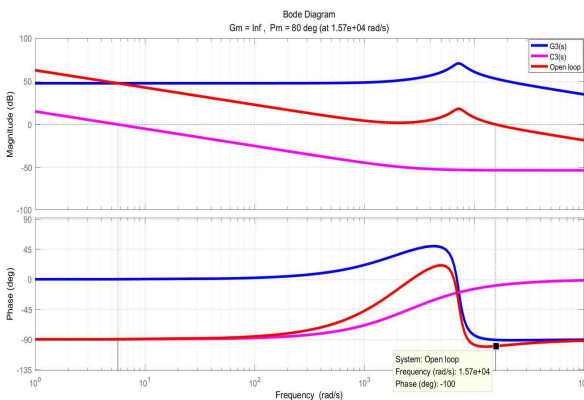


그림 4 부스트 컨버터 주파수 응답  
Fig. 4 Frequency response of boost Converter

### 2.3 시뮬레이션

설계된 제어기 검증을 위해 PSIM을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 출력전력 35[kW]의 시스템 파라미터는  $V_F=400[V]$ ,  $V_{dc}=550[V]$ ,  $L=100[\mu H]$ ,  $R_L=50[m\Omega]$ ,  $C=100[\mu F]$ ,  $R_F=1.25[m\Omega]$ 이다. 그림 5는 벡 컨버터 지령 전압을 400[V]로 하였을 때 전압과 전류에 대한 파형이다. 오버슈트 없이 안정된 결과 응답을 확인하였다. 그림 6은 부스트 컨버터 지령 전류를 87.5[A]로 하였을 때 전류에 대한 파형이다. 전류파형은 오버슈트 없이 2[msec] 정착시간으로 안정된 결과 응답을 확인하였다.

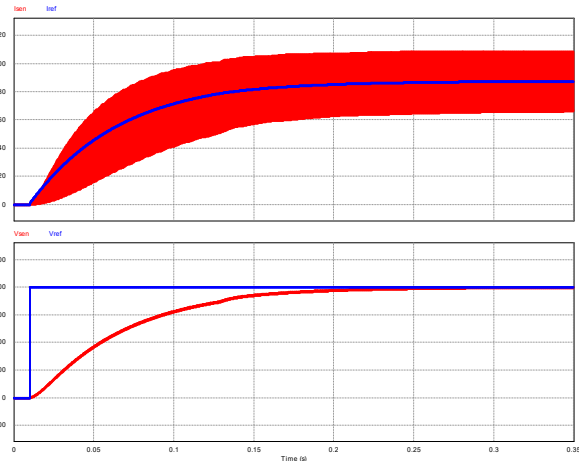


그림 5 벡 컨버터 시뮬레이션 파형  
Fig. 5 Simulation waveform of buck converter

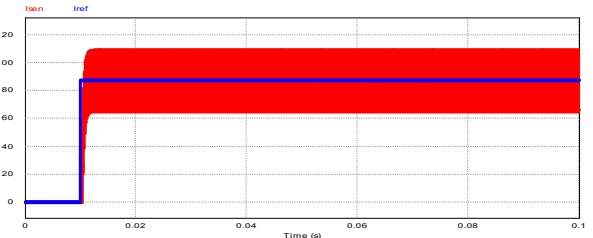


그림 6 부스트 컨버터 시뮬레이션 파형  
Fig. 6 Simulation waveform of boost converter

## 3. 결론

본 논문에서는 연료전지용 양방향 벡-부스트 컨버터의 전달함수를 통해 Matlab으로 주파수응답을 해석하였고, PI제어기 게인 값을 선정하였다. 주파수응답 해석과 설계된 제어기 검증은 PSIM 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

이 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20010855)

## 참고 문헌

- [1] 김희준, “스위칭 전원의 기본해석 1”, 피엔에이스쿨, 2012.
- [2] M. Godoy Simoes, Felix A. Farret, “Modeling Power Electronics and Interfacing Energy Conversion Systems”, John Wiley & Sons, 2016.