

연료전지 발전 시스템을 위한 양방향 DC-DC 컨버터 설계 및 제어

김승민*, 양승대*, 최익*, 최주엽*, 이상철**, 이동하**

*광운대학교, **대구경북과학기술원

The Design and Control of Bi-directional DC-DC Converter for a Fuel Cell Power System

Kim, Seung Min*, Yang, Seung Dae*, Choy, Ick*, Choi, Ju Yeop*, Lee, Sang Cheol**, Lee, Dong Ha**

*Kwangwoon University(seungmin@kw.ac.kr), **Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology

ABSTRACT

연료전지는 매우 낮은 응답속도를 가지므로 부하 증가시 Li Ion 배터리나 슈퍼 커패시터 같은 별도의 에너지 저장장치로부터 필요한 전류를 공급받도록 구성되는데 이들 사이에서 전력전달을 위해 DC DC 컨버터가 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 상태평균화 기법과 PWM 스위치 모델을 사용하여 DC DC 컨버터를 해석하고 시뮬레이션 하였다. 또한 배터리 등가회로를 구성해서 배터리 등가 임피던스를 고려한 이중루프 제어를 설계하고 정전류/정전압 충전모드 시뮬레이션을 통해 효과를 확인하였다.

1. 서론

현재 스마트 그리드 산업으로 인하여 신재생 에너지의 활용이 증진되고 있다. 이러한 시점에서 신재생 에너지를 더욱 효율적이고 안정적으로 사용하기 위해서 에너지 저장장치의 필요성이 부각되고 있다. 신재생 에너지원의 출력은 자연조건 및 외부요인에 의해 상당한 영향을 받기 때문에 신재생 에너지를 포함하는 분산형 발전은 계통에 안정적인 출력을 공급하도록 배터리 같은 에너지 저장장치를 갖게 되는데, 이들 에너지 저장장치의 충·방전을 위해 양방향 DC DC 컨버터가 사용된다.

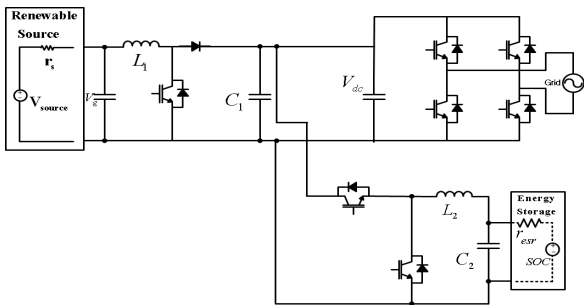


그림 1. 에너지 저장장치를 포함하는 신재생 에너지 발전시스템
양방향 DC DC 컨버터는 방전시에는 부스트 컨버터로 동작하는데, 배터리의 저전압을 DC Link단의 고압으로 승압시키기 위해 두개의 부스트 컨버터의 Cascade로 연결하여 고승압비를 갖도록 하는 토폴로지를 사용한다. 한편, 배터리 충전시에는 Buck 컨버터로 동작하며 배터리 충전시 발생하는 내부소자들의 손상을 최소화하기 위해 정전류 정전압 충전을 한다. 이를 위해선 전류 전압의 이중루프 제어를 설계해야 하며, 전압 제어는 차치하더라도 전류제어를 잘 설계하려면 컨버터 모델링이 필수적으로 요구된다.

2. 컨버터 모델링 및 제어기 설계

2.1 충전 회로 모델링

양방향 DC DC 컨버터가 충전시에는 DC Link 전압에서 배터리로 전압을 감압시키는 역할을 하게 되므로 Buck 컨버터로 동작하게 된다. 표1은 컨버터가 충전모드로 동작할 때의 주요 설계 사양이다.

표 1 충전 회로의 주요 설계 사양

Table 1 Per unit values of the charger circuit

구분	기호	파라미터값	구분	기호	파라미터값
출력 전력	P	2kW	커패시터 내부저항	r_c	0.01Ω
입력 전압	V_{in}	180V	인덕터 내부저항	r_l	0.1Ω
출력 전압	V_o	48V	스위칭 주파수	f_s	20kHz
인덕터	L_e	230uH	전류제어기 교차주파수	f_{cv}	3kHz
커패시터	C	320uF	전압제어기 교차주파수	f_{cv}	300Hz

상태변수 평균화기법과 회로 평균화기법을 사용하여 컨버터를 모델링하였다. 다음은 상태변수 평균화기법을 통해 컨버터를 모델링하여 구한 전달함수와 보드선도이다.

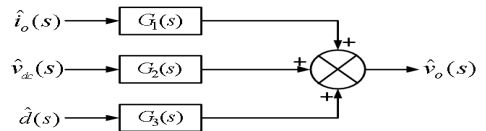


그림 2. 컨버터의 전달함수 블록도

$$G_1(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{i}_o(s)} = \frac{1}{\Delta} \cdot \frac{R \cdot r_c}{R + r_c} \cdot \left(s^2 + \frac{1}{C r_c} s \right)$$

$$G_2(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_{dc}(s)} = \frac{1}{\Delta} \cdot \frac{(1-D)}{L} \cdot \left(\frac{R \cdot r_c}{R + r_c} \right) \cdot \left(s + \frac{1}{C R \cdot r_c} \right) \quad (1)$$

$$G_3(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = -\frac{V_{dc}}{\Delta} \cdot \left(\frac{R \cdot r_c}{L(R + r_c)} \right) \cdot \left(s + \frac{1}{C r_c} \right)$$

$$\text{where, } \Delta = s^2 + \left(\frac{C R r_c + L}{L C (R + r_c)} \right) s + \left(\frac{R}{L C R (R + r_c)} \right) \quad (2)$$

다음으로 회로 평균화기법을 통해 역 컨버터를 모델링한 전달함수와 보드선도이다.

$$Z_f = \frac{R\left(s^2LC + s\frac{L}{R} + 1\right)}{1 + sRC} \quad (3)$$

$$G_{vd} = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_{in}}{s^2LC + s\frac{L}{R} + 1} \quad (4)$$

$$w_o = 1/\sqrt{LC}, \quad G_{vd} = \frac{V_{in}\omega_o^2}{s^2 + s\frac{1}{RC} + \omega_o^2} \quad (5)$$

$$G_{id} = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_{in}}{Z_f} \quad (6)$$

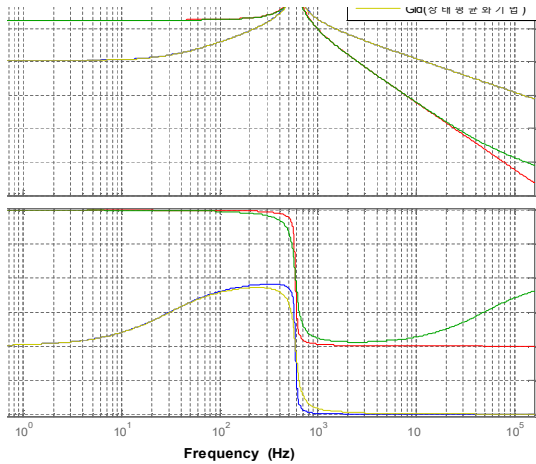


그림 3. 충전 회로의 제어 전달함수 보드선도

두 가지 기법으로 구한 컨버터의 전달함수에 대한 보드선도가 서로 거의 같은 곡선을 보인다.

2.2. 배터리 등가회로를 포함한 컨버터 전달함수

R과 C 그리고 SOC(State of Charge)로 배터리의 전기적 등가회로를 나타낼 수 있다. 컨버터의 전달함수를 구하기 위해 배터리와 필터 커패시터의 등가 임피던스를 구하면 식(7)과 같다.

$$z_{eq}(s) = \left(R_b + \frac{1}{sC_b} \right) \parallel \left(R_c + \frac{1}{sC_f} \right) \quad (7)$$

$$= \frac{s^2(R_b C_b R_c C_f) + s(R_b C_b + R_c C_f) + 1}{s^2(C_b R_c C_f + C_f R_b C_b) + s(C_b + C_f)}$$

where, $R_b = 118m\Omega$, $C_b = 91250F$

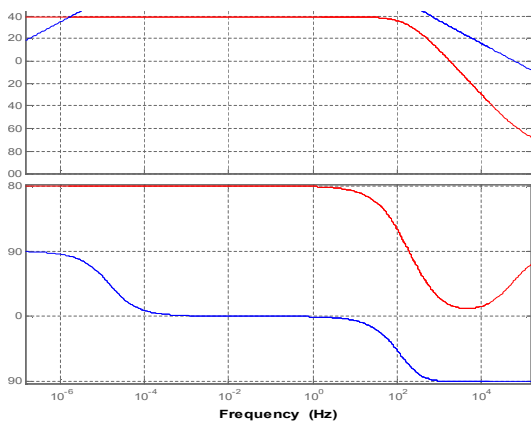


그림 4. 배터리 등가회로를 고려한 컨버터 전달함수

2.3. 이중 루프 제어기 설계

이중루프 제어기는 전압제어루프 안에 전류제어루프가 포함되는 형태로, 전류제어는 스위치 주파수의 약 1/10 주파수로 제어주기가 실행되도록 하고 전압제어는 전류제어주기의 약 1/10 주기로 실행되도록 설계한다. 이로써 순간적으로 큰 전압 변동에도 내부에 전류제어가 실행되고 있어 오버슈트 없이 안정적인 과도응답특성을 나타낸다. K Factor Approach를 통해 전류제어기는 2Pole 1Zero 제어기로 구성되고, 전압제어는 1Pole 1Zero 제어기로 구성된다. 시스템이 좋은 과도특성을 가지기 위해서는 제어기를 포함한 개루프의 위상여유를 45°~60° 사이로 맞추었다.^[1]

3. 시뮬레이션 결과

앞서 설계한 제어기의 시간응답 특성을 PSIM을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 그림5는 전압·전류 이중루프 제어를 하는 경우에 전압 전류의 파형이다. 과도상태에서 오버슈트 없이 빠르고 안정적으로 기준 값을 따라가는 것을 확인할 수 있다.

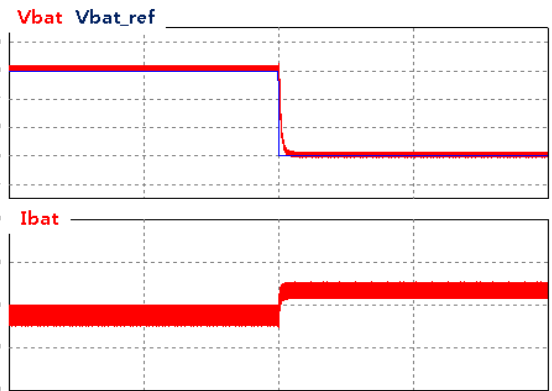


그림 5. 전압·전류 이중제어루프의 성능 시뮬레이션 결과

그림6은 CC/CV 충전 모드의 시뮬레이션 파형이다. 충전 초기에는 전류를 일정하게 하여 충전하다가 충전 말기에는 전압을 일정하게 하여 충전 시 발생하는 손상을 최소화할 수 있다.

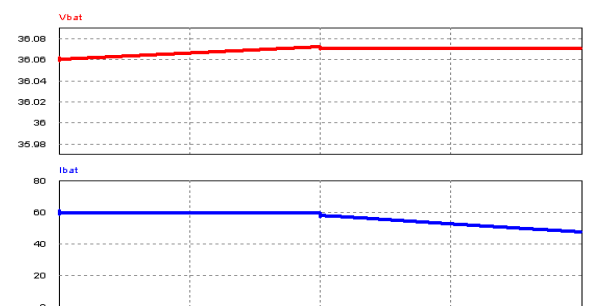


그림 6. 정전류/정전압(CC/CV) 충전 모드의 시뮬레이션

4. 결론

단일루프 제어보다 이중루프 제어를 했을 때 과도상태에서 오버슈트 없이 안정적으로 기준값을 따라가므로 시스템이 안정적이게 된다. 또한 CC/CV 충전 모드가 가능하면 컨버터의 내부 소자의 손상을 줄일 수 있다.

본 연구는 교육과학기술부에서 지원하는 대구경북과학기술원 일반사업(12 BD 0101)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Tae Hoon Kim, "Design and Control of the Phase Shift Full Bridge Converter for the On board Battery Charger of Electric Forklifts", JPE 12 1 15