

양방향 배터리 충방전 컨버터의 소신호 해석과 제어기 설계

최석재, 김동명, 김수한, 최병조
경북대학교

Small-Signal Analysis and Control Design of a Bidirectional Battery Charging/Discharging Converter

Seokjae Choi, Dongmyung Kim, Suhan Kim, Byungcho Choi
Kyungpook National University

ABSTRACT

본 논문에서는 dc 버스기반의 전력시스템에서 양방향 배터리 충방전 회로의 기능을 하는 부스트 컨버터의 소신호 해석과 제어기를 설계 하였다. 컨버터가 동작하는 동안 컨버터의 듀티비 대 출력 전달함수에 나타나는 s 도메인 평면의 오른쪽편과 왼쪽편에 걸쳐 움직이는 RHP 영점 대해 새롭게 밝히고, 움직이는 영점의 근원과 그것 따른 제어기 설계 결과를 보여준다.

1. 서 론

양방향 부스트 컨버터의 제어기 설계시 고려해야 할 사항은 충방전 모드에 관계없이 안정적인 동특성을 가져야 한다는 것이다. 부스트 컨버터의 경우 듀티비 대 출력전압 전달함수에 RHP 영점을 포함하고 있으며, 이 영점은 충방전 모드의 상태에 따라 유동적으로 움직인다. 본 논문에서 PSpice 와 PSim 시뮬레이션을 이용하여 피크 전류모드제어를 적용한 양방향 부스트컨버터의 소신호 해석 및 RHP 영점의 변화에 따른 제어기 설계 방법을 제시한다. 또한 동작모드에 따른 RHP 영점의 변화를 식으로 유도해내고 시뮬레이션을 통해 검증 한다.

2. 양방향 부스트 컨버터

2.1 회로구성

그림 1 은 양방향 부스트 컨버터의 회로 구성을 나타내고 있다. 2개의 전원단 모듈이 병렬로 구성되어 있으며, 각 모듈은 180도의 위상차를 가지며 동작한다. 컨버터는 I_{grid} 의 상태에 따라 다음과 같은 3가지 모드로 동작 한다.

$I_{grid} = I_{load}$: 충·방전 대기(Standby) 모드

$I_{grid} < I_{load}$: 방전 (Discharging) 모드

$I_{grid} > I_{load}$: 충전 (Charging) 모드

2.2 전류루프가 닫힌 제어대 출력전압

2개의 모듈이 병렬로 연결된 양방향 부스트 컨버터의 소신호 모델은 차수를 간단히 한 소신호 모델로 등가화 할 수 있다. 그림 2 는 차수를 간단히 한 소신호 모델을 이용한 전류루프가 닫힌 제어대 출력전압의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있으며, 전류루프가 닫힌 제어대 출력전압의 전달 함수는 식(1) 과 같이 표현 할 수 있다.

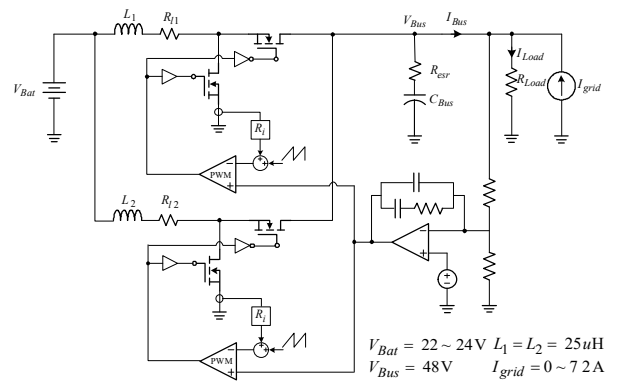


그림 1 양방향 부스트 컨버터

Fig. 1 Bidirectional boost converter.

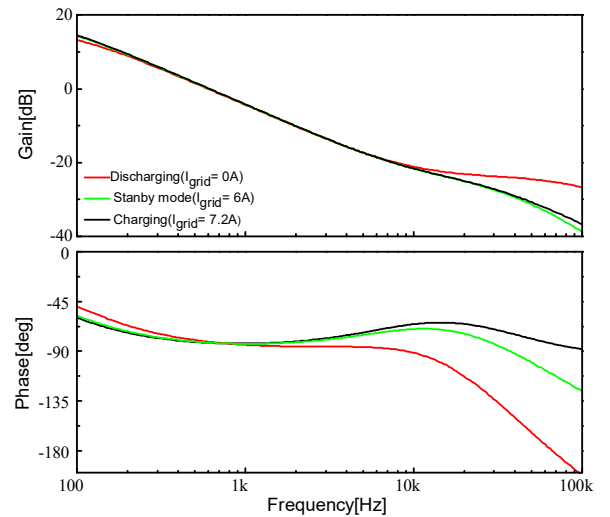


그림 2 전류루프가 닫힌 제어대 출력전압

Fig. 2 Control to output transfer function with current loop closed.

$$G_{vci}(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_c} = K_{vc} \frac{(1+s/\omega_{csr})(1-s/\omega_{rhp})}{(1+s/\omega_p)(1+s/Q_P\omega_n+s^2/\omega_n^2)} \quad (1)$$

그림 2와 그림 3에서 I_{grid} 의 전류량에 따라 RHP 영점(ω_{rhp})과 저주파 극점(ω_p)이 이동하는 것을 확인 할 수 있으며, RHP 영점(ω_{rhp})과 저주파 극점(ω_p)의 위치는 식(2)와 식(3)의해 결정 된다.

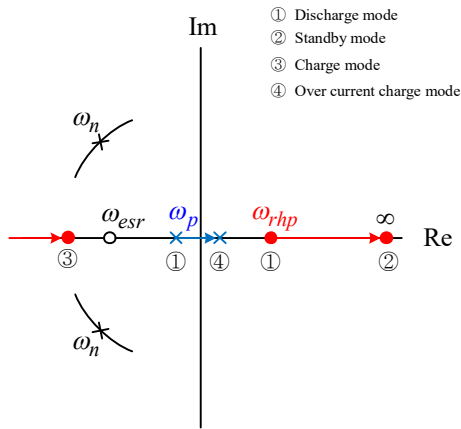


그림 3 모드변화에 따른 극점과 영점의 위치변화
Fig. 3 Mode change and location of poles and zeros.

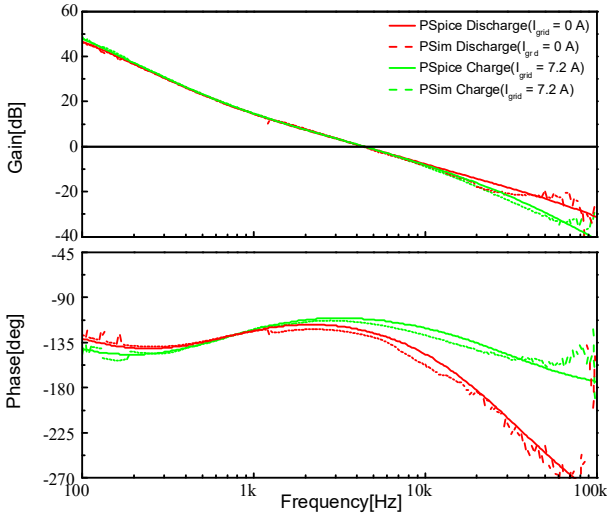


그림 4 방전모드와 충전모드의 외부 루프이득
Fig. 4 Outer loop gain in discharging and charging modes.

$$\omega_{rhp} = \frac{V_{Bus}/I_{Bus}}{L/D^2} \quad (2)$$

$$\omega_p = \frac{D^2 T_s (D'(mc+0.5)-1) + \frac{L}{\left(\frac{R_{Load}(V_{Bus}/I_{Bus})}{R_{Load} + V_{Bus}/I_{Bus}}\right)}}{LC_{Bus}} \quad (3)$$

2.3 제어기 설계

양방향 부스트 컨버터의 제어기는 동작모드에 상관없이 안정성을 유지하도록 설계 되어야 한다. 그림 2에서, 방전모드의 경우 다른 모드에 비해 비교적 적은 위상 여유를 가짐을 예측할 수 있으므로, 방전모드에서 충분한 위상여유를 가지도록 제어기를 설계해야 한다. 제어기는 식(4)와 같은 2 극점 1 영점 구조로 설계 하였으며 영점과 극점의 위치는 식(5)와 같다.

$$F_v(s) = K_v \frac{(1+s/\omega_{zc})}{s(1+s/\omega_{pc})} \quad (4)$$

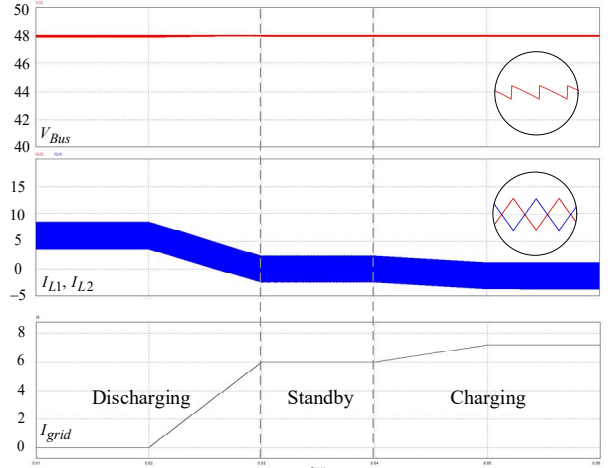


그림 5 양방향 부스트 컨버터의 시간영역 시뮬레이션
Fig. 5 Time-domain simulation of bidirectional boost converter.

$$\omega_{pc} = \omega_{esr} \quad \omega_{zc} = 0.8\omega_o \quad (5)$$

2.4 시뮬레이션 결과

그림 4은 설계된 제어기를 적용한 양방향 부스트 컨버터의 방전모드와 충전모드에서의 외부루프이득을 보여준다. 방전모드에서 57°의 위상여유를 가지고 충전모드에서 68°의 위상여유를 가지므로 방전모드보다 충전모드에서 더 안정함을 확인 할 수 있다. 그림 5는 설계된 양방향 부스트 컨버터의 시간영역 시뮬레이션을 보여주고 있다. 방전모드에서 I_grid 전류의 증가로 인해 대기모드와 충전모드로 동작함에도 안정적인 출력전압과 모듈간 전류분배가 잘 이루어짐을 확인 할 수 있다

3. 결론

양방향 부스트 컨버터의 동작 모드에 따른 RHP 영점(ω_{rhp})과 저주파 극점(ω_p)의 위치 변화를 소신호 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 확인하고 식으로 유도 하였다. 또한 양방향 부스트 컨버터의 제어기 설계시, 비교적 위상여유를 적게 가지는 방전모드에서 설계 하여 동작모드에 상관없이 안정성을 유지하도록 하였으며 루프이득 해석과 시간영역에서의 시뮬레이션을 통해 컨버터 동작의 안정성을 검증 하였다.

본 연구는 지식경제부 지역혁신센터(첨단디스플레이제조 공정및장비연구센터) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] D. M. Sable, F. C. Lee, and Bo. H. Cho, "A Zero Voltage Switching Bidirectional Battery Charger/Discharger for NASA EOS Satellite", APEC 1992, pp.614-621.
- [2] Byungcho Choi, Bo H. Cho and Sung soo Hong, "Dynamics and Control of DC to DC Converters Driving Other Converters Downstream", IEEE Transactions on circuits and systems, Vol. 46, No. 10, Oct 1999