

양방향 DC-DC 컨버터의 소신호 모델링 및 제어기 설계 연구

전승욱, 배선희, 권나래, 김혜천, 성동호, 박정욱
연세대학교

A Study on Small-Signal Model and Controller Design of Bi-directional DC-DC Converter

Jeon Seung Uk, Bae Sun Ho, Kwon Na Rae, Kim Hye Cheon, Seong Dong Ho, Park Jung Wook
Yonsei University

ABSTRACT

배터리를 사용하는 하이브리드 시스템의 확장으로 인하여 2차 전지를 활용할 수 있는 양방향 컨버터의 사용이 증가하고 이에 대한 연구의 필요성 또한 증가하고 있다. 기존 비절연형 단방향 컨버터는 인덕터의 전류와 부하단 캐패시터의 전압을 변수로 지정하고 고정 전원과 고정부하를 대입하여 모델링에 적용했지만, 실제 사용되는 양방향 컨버터의 동작과는 차이가 있다. 또한 이상적인 전원은 달리 배터리의 단자전압은 SOC 및 충전 상태에 따라 전압 변동이 일어나고 컨버터의 스위칭 동작에 의해 전압 리플이 발생하기 때문에 제어기를 설계하기 위해서는 이를 반영하여 해석하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 비절연형 양방향 컨버터의 양쪽에 부착된 캐패시터가 모두 변수로 적용된 전달함수와 이를 이용하여 설계된 제어기를 제안한다. 컨버터 모델링에 State Space Averaging 방법을 사용하여 양방향 컨버터의 소신호 분석을 하였고, 충전 모드와 방전 모드 일때 전달함수를 각각 구하였다. 앞서 구한 전달함수를 이용하여 pole/zero 분석을 통해 PI 제어기 설계를 하였고, 주파수 분석을 통해 안정성을 확인하였다.

1. 서론

에너지원의 효율적인 사용방법에 대한 수요가 높아짐에 따라 에너지 저장장치를 적용하여 효율을 높이는 방법 또한 증가하고 있다. 충·방전이 가능한 2차 전지를 활용할 수 있도록 하는 양방향 컨버터의 사용이 증가하고 배터리 동작을 반영한 모델링의 필요하다. 기존의 비절연형 양방향 DC DC 컨버터 모델링 방식은 전압원과 부하의 전압이 고정인 상태에서 전달함수를 도출한 뒤 제어기를 설계하였다. 그리하여 전압이 가변하는 배터리의 특성과 하드웨어의 특수한 상황에 따라 제어기 계수를 수정하는 것으로 시스템을 설계, 활용하였다. 하지만 실제 배터리가 부착되어 동작하면 전압은 고정적이지 않게 되고, 전류의 흐름이 연속적이기 때문에 이러한 상태를 반영하는 연구를 수행하였다. 본 논문 2장에서는 State Space Averaging 방식을 이용한 비절연형 양방향 컨버터의 모델링에 대해 소개한다. 그리고 3장에서 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션을 통하여 아이디어를 확인하였다.^[1]

2. 컨버터 모델링

2.1 토폴로지 비교

전력변환 장치로 사용되는 양방향 DC DC 컨버터의 토폴로지는 아래 그림 1(b)와 같다. 양방향 컨버터는 고전압단과 저전압단에 병렬로 연결된 캐패시터 각 1개, 인덕터 1개와 다이오드가 포함된 스위치 2개로 구성되어 있다. 비절연형 양방향 컨버터는 고전압단과 저전압단에 캐패시터가 병렬로 연결되어 있다. 이상적인 전원의 경우 그림 1(a)과 같이 전력 공급 시 전압의 변동이 없게 되고, 이 때문에 전원 공급단 캐패시터의 전압이 변하지 않아 컨버터의 동작에 참여하지 않는다. 하지만 배터리 같은 고정적이지 않는 전원을 사용하는 경우 스위칭 동작에 따라 전압이 변하게 되어 컨버터의 동작에 참여하게 되고 이를 반영하여 모델링을 진행하게 되었다.^[1]

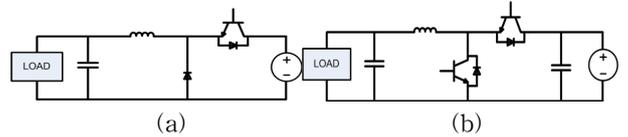


그림 1 비절연형 컨버터 토폴로지

Fig. 1 Non-isolated Converter Topology (a) Uni-direction (b) Bi-direction

2.2 전달함수 유도

전달함수를 유도하는 방법으로 컨버터 모델링에 많이 사용되는 State Space Averaging 방법을 적용하였다. 아래 그림 2와 같이 양방향 컨버터의 동작은 Buck mode와 Boost mode의 on/off 동작별로 나누어 총 4개로 분류 할 수 있다.^[2]

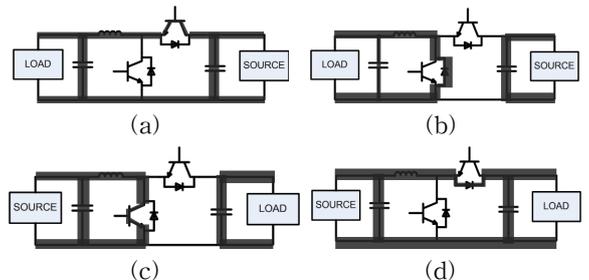


그림 2 양방향 컨버터 동작

Fig. 2 Bi-Directional Converter Operation mode

(a)Buck-on (b)Buck-off (c)Boost-on (d)Boost-off

스위치가 on일때와 off일 때를 평균 내어 1차 미분방정식을 식 (1)과 같이 도출하고, 식 (2)와 같이 소신호를 대입하여, 컨버터의 duty ratio 변화에 따른 전달함수를 도출하기 위한 소신호 분석은 아래 식 (3)처럼 유도할 수 있다.

$$\dot{X} = (d \cdot A_{on} + (1-d) \cdot A_{off})X + (d \cdot B_{on} + (1-d) \cdot B_{off})I_s \quad (1)$$

$$\dot{\tilde{X}} = (d \cdot A_{on} + (1-d) \cdot A_{off})\tilde{X} + [(A_{on} - A_{off})X + (B_{on} - B_{off})I_s]\tilde{d} \quad (2)$$

$$\frac{\tilde{v}}{d} = C[sI - A]^{-1}B' \quad (3)$$

각 동작별 전력의 이동을 분석하고 이를 기반으로 1차 미분방정식을 유도하였고, 전달함수를 아래 식과 같이 구하였다. 전원 공급단 캐패시터가 없는 Buck 컨버터의 경우 결과가 아래 식 (4)과 같이 분모가 2차인 함수로 도출된다.^[2]

$$\frac{\tilde{v}}{d} = \frac{V_s R}{LRC_{lv}s^2 + Ls + R} \quad (4)$$

본 논문에서 제시하는 전달함수는 입력단의 캐패시터가 컨버터의 동작에 참여하기 때문에 일반적인 모델인 2차식이 아닌 식 (5)와 (6)과 같이 분모가 3차인 식으로 도출되었다.

$$T.F_{buck} \frac{\tilde{v}}{d} = \frac{-RC_{hv}s + DR I_L}{LRC_{hv}C_{lv}s^3 + LC_{hv}s^2 + (C_{lv}RD^2 + RC_{hv})s + D^2} \quad (5)$$

$$T.F_{boost} \frac{\tilde{v}}{d} = \frac{LC_{lv}R I_L s^2 - (1-D)RC_{hv}V_{hv}s + R I_L}{LRC_{hv}C_{lv}s^3 + LC_{hv}s^2 + (RC_{lv} + RC_{hv} + R_w D^2)s + 1} \quad (6)$$

$$T.F_{buck-gain} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\tilde{v}}{d} = \frac{DR I_L}{D^2} \approx \frac{V_{lv}}{D} \quad (7)$$

$$T.F_{boost-gain} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\tilde{v}}{d} = \frac{R I_L}{1-D} = \frac{R I_{hw}}{1-D} \approx \frac{V_{hw}}{1-D} \quad (8)$$

이렇게 유도한 전달함수의 Steady State Gain을 확인하였다. Buck mode의 경우 식 (7)에서 입력값인 duty ratio D에 대해 전달함수의 이득이 저전압 출력이 올바르게 나옴을 확인하였고, Boost mode의 경우 식 (8)과 같이 duty ratio (1-D)에 대해 전달함수 이득이 고전압 출력으로 나옴을 확인하였다.

2.3 PI 제어기 설계

위 식(5)와 (6)에서 구한 전달함수를 적용하여 컨버터 제어기 설계에 적용하였다. 본 논문에서는 2kW급 48Vdc 12Vdc 양방향 컨버터의 소자 값을 대입하여 전달함수를 만들었고, 이를 제어기 설계에 적용하였다. PI 제어기를 설계하기 위해 근계적과 주파수 분석을 통하여 제어기의 비례이득 값을 구하였다.

표 1 2kW 양방향 컨버터 파라미터

Table 1 2kW Bi-Directional Converter Parameters

Parameter	Value
High voltage	48 [V]
Low voltage	12 [V]
Load resister(boost)	1.152 [Ω]
Load resister(buck)	0.072 [Ω]
Inductor	6.8 [μ H]
High voltage Capacitor	320 [μ F]
Low voltage Capacitor	110 [μ F]

3. 시뮬레이션 결과

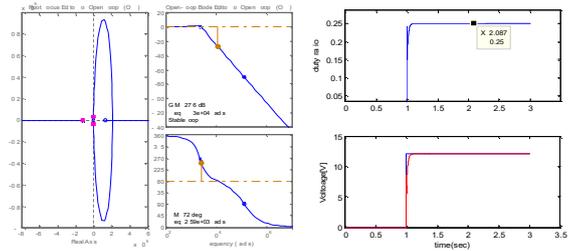


그림 3 Buck mode 시뮬레이션 결과

Fig. 3 Buck mode Simulation Result (a)Frequency responses (b)Dutyratio and voltage

위에서 구한 전달함수를 그림 3(a)와 같이 bode plot을 통하여 주파수 응답을 확인하였고, 근계적을 이용하여 제어기 gain을 구하였다. 입력 전압을 인가하였을 때 그림 3(b)와 같이 레퍼런스 전압과 같아짐은 물론 duty ratio가 0.25를 나타내며 시스템이 올바르게 구성됨을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 배터리를 사용하는 비절연형 양방향 DC DC 컨버터의 충·방전 상태를 모델링하여 전달함수로 도출하고 제어기를 설계하였다. 배터리의 실제 동작을 반영하여 모델링을 진행하였으며, 시뮬레이션을 통해 전달함수 이득을 확인하였다. 그리고 양방향 컨버터의 제어를 위해 실제 사용된 2kW급 양방향 컨버터의 소자값을 적용하여 전달함수 이득을 구하였다. 추가적으로 2kW 양방향 컨버터 하드웨어에 적용하여 제어의 안정성을 검증할 예정이다.

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구자지원(도약 전략) 연구(No 2011-0028065)입니다.

참고 문헌

- [1] Yu Du, Xiaohu Zhou, Sanzhong Bai, Lukic, S., Huang, A, "Review of non isolated bi directional DC DC converters for plug in hybrid electric vehicle charge station application at municipal parking decks". *Applied Power Electronics Conference and Exposition IEEE*, 2010, pp. 1145-1151
- [2] Daniel W. Hart. "Power Electronics", McGrawHill. p472.