

넓은 입·출력범위를 가진 양방향 벡-부스트 컨버터용 아날로그 제어기 설계 및 분석

우태규, 최기호, 채훈규, 안효민, 이병국[†]
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Design and Analysis of Analog Controller for Bi-directional Buck-Boost Converter with Wide Input/Output Range

Tae Gyo Woo, Gi Ho Choi, Hun Gyo Chae, Hyo Min Ahn, and Byoung Kuk Lee[†]
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 ESS (Energy Storage System)용 양방향 벡 부스트 컨버터가 부하 변화에 상관없이 안정적인 전압제어를 하기 위한 아날로그 제어기를 설계한다. 양방향 벡 부스트 컨버터의 소신호 모델을 이용하여 일반화된 전달 함수를 구하고 이를 기반으로 입·출력 부하 변화와 충·방전 모드 변화에 상관없이 안정적인 전압제어를 위한 제어기를 설계한다. 그리고 시뮬레이션을 이용하여 제어기 설계 과정의 타당성을 밝히고 설계한 제어기의 성능을 분석한다.

1. 서론

에너지원의 효율적인 사용방법에 대한 수요가 높아지면서 에너지 저장장치를 적용하여 효율을 높이는 시스템인 ESS (Energy Storage System)의 중요해지고 있다. ESS를 구동하기 위해선 충·방전이 가능한 양방향 DC DC 컨버터가 필요하다. 여러 양방향 DC DC 컨버터 중에서 그림1과 같이 소자수가 적어 각 소자에서 발생하는 손실이 적고 동기제어 방식을 사용해 대용량 전력 체계에서 도통 손실이 적은 양방향 벡 부스트 컨버터가 적합하다.^[2]

본 논문에서는 양방향 벡 부스트 컨버터의 DC link 전압을 일정하게 유지하는 제어기를 설계한다. 해당 제어기가 넓은 입·출력 범위에서 부하 혹은 입·출력 전압이 변화할 때 충·방전모드가 바뀔 때 높은 속응성을 가지도록 한다. 또한 순간적인 과전류로 인해 소자에 스트레스가 가해지는 것을 방지하기 위해 댐핑률도 작게 설계한다. 그리고 시뮬레이션을 이용하여 제어기 설계 과정의 타당성을 밝히고 설계한 제어기의 성능을 분석한다.

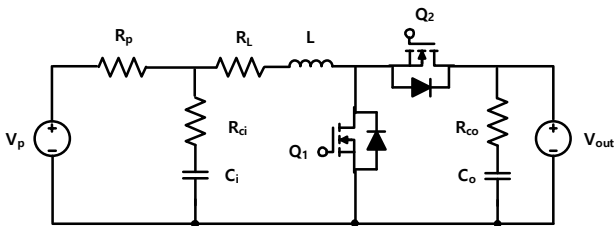


그림 1 양방향 벡-부스트 컨버터
Fig. 1 Bi-directional buck-boost converter

2. 제어기 설계

2.1 넓은 입·출력 전압 범위 설계

본 논문에서는 제어기가 넓은 입·출력 범위를 가지도록 설계해야 한다. 그런데 그림 2와 같이 낮은 전압을 기준으로 설계하면 높은 전압이 들어갈 때 Gain margin이 너무 작아져서 쉽게 불안정해질 수 있다. 또 높은 전압을 기준으로 설계하면 낮은 전압이 들어갈 때 목표한 차단 주파수를 얻을 수가 없기 때문에 목표한 속응성도 얻을 수 없다. 따라서 이를 반영하여 기존 설계법에서 추가적인 조정이 필요하다.

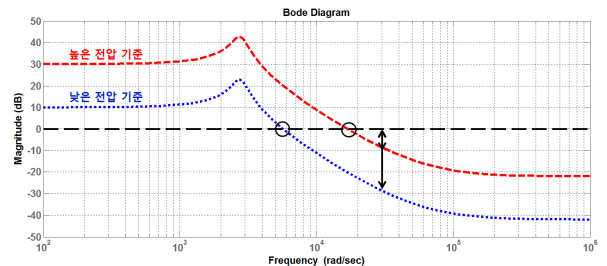


그림 2 높은 전압 기준 설계와 낮은 전압 기준 설계 비교
Fig. 2 Comparison of high and low voltage design

2.2 소신호 모델링

두 개의 모드를 동시에 제어하는 제어기를 구성하기 위해서는 전달함수가 필요하고 전달함수를 구하기 위해서는 양방향 벡 부스트 컨버터의 소신호 모델링을 해야 한다. 기존의 부스트 컨버터의 상태공간평균화법을 이용한 전달함수 획득 과정을 따라서 스위칭 손실을 고려한 후 양방향 벡 부스트 컨버터의 전달함수를 구한다. 제어전달함수는 식(1)을 식(2)에 대입한 것과 같다. 그림 3은 제어전달함수를 이용하여 구한 양방향 벡 부스트 컨버터의 개방회로 보데 플롯이다.^{[1][2]}

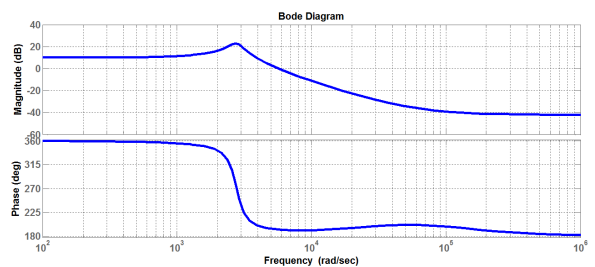


그림 3 개방회로 보데 플롯
Fig. 3 Open-loop bode plot

$$R_{eff} = R_L + R_s + (1-D)R_{\omega} \quad (1)$$

$$G_d(s) = \frac{-\frac{R_{\omega}I_o}{1-D}s^2 - \frac{LI_o + C_oR_{\omega}I_oR_{eff}}{(1-D)LC_o}s + \frac{(1-D)V_p - I_o(R_L + R_s + R_{eff} + (1-D)^2R_{\omega}I_o)}{(1-D)LC_o}}{s^2 + \frac{R_{eff}}{L}s + \frac{(1-D)^2}{LC_o}} \quad (2)$$

2.3 보상회로 설계

양방향 벡 부스트 컨버터의 개방회로 보데플롯이 부스트 컨버터의 개방회로 보데 플롯과 유사하여 기존 부스트 컨버터 설계법을 이용하여 설계를 진행한다.^[1] 하지만 넓은 입력 범위를 가지는 벡 부스트 컨버터에 적용하기 위해서는 몇 가지 수정이 필요하다. 우선 기존 설계법에서는 교차 주파수를 우반면 영점의 영향을 최소화하기 위해 우반면 영점의 약 10%정도로 설정한다. 그러나 양방향 벡 부스트 컨버터에선 기존 설계법을 따를 경우 낮은 전압에서 차단 주파수가 너무 작아 목표한 속응성을 얻을 수 없다. 때문에 본 논문에서는 교차 주파수를 기존의 10%에서 30%로 상향한다. 또 기존 설계법은 Pole Zero Cancellation 효과를 얻기 위해서 우반면 영점에 2번째 극점을 위치시킨다. 하지만 본 논문에서는 낮은 전압에서 Phase margin이 너무 커지는 과보상을 막기 위해 우반면 영점의 50%에 2번째 극점을 위치시킨다.

그림 4의 그래프는 보상회로를 추가한 후의 보데 플롯으로 안정적인 Phase margin과 Gain margin을 확보함으로써 시스템이 안정화된 것을 보여준다.

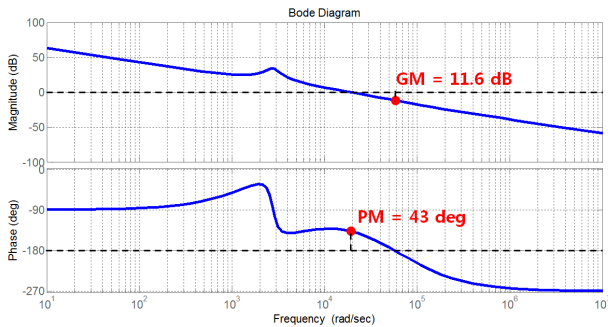


그림 4 보상회로 추가 후 보데플롯
Fig. 4 Bode plot with the compensation circuit

2.4 시뮬레이션

표 1은 양방향 벡 부스트 컨버터의 설계 사양이며 이를 적용하여 시뮬레이션을 진행한다. 이 때, 충·방전모드 모두 이 설계 사양을 적용한다.

표 1 시뮬레이션 사양
Table 1 Simulation specification

	배터리 단	DC link 단
제어 전압 범위	200~600 V	650 V
커패시터	100 μ F	330 μ F
커패시터 내부저항	160 m Ω	80 m Ω
인덕터	35 m Ω	
인덕터 권선 저항	150 μ H	
스위칭 주파수	100 kHz	
MOSFET	710 V, 138 A, 0.015 Ω	
DC link 전압 ripple	2 % 미만	

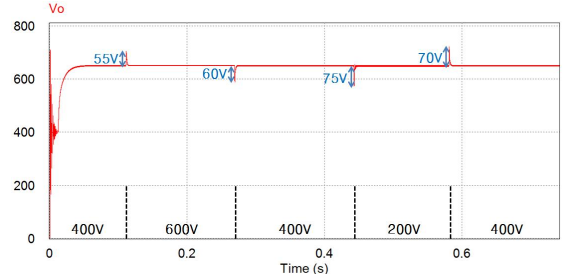


그림 5 고정부하에서 배터리 전압변화 시 DC link 전압파형
Fig. 5 DC link voltage by battery voltage in fixed load

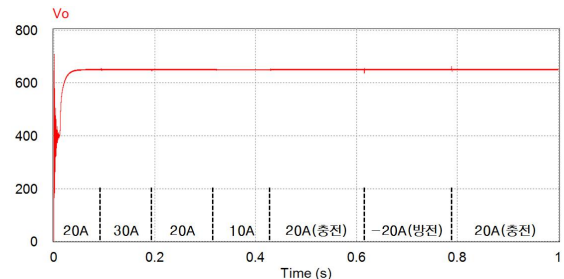


그림 6 고정전압에서 부하와 모드변화 시 DC link 전압파형
Fig. 6 DC link voltage by load and mode in fixed voltage

그림 5는 고정부하에서 배터리 전압변화에 따른 DC link 전압의 파형이다. 최대 ripple은 75V이고 모든 배터리 전압 조건에서 10ms내의 속응성을 가진다. 그리고 그림 6은 고정 배터리 전압에서 부하와 모드변화에 따른 DC link 전압 파형으로 최대 ripple은 10V 내로 매우 작고 속응성도 높아 갑작스런 부하와 모드변화에도 정전압 제어를 유지한다.

3. 결론

본 논문에서는 충·방전이 모두 가능한 양방향 벡 부스트 컨버터의 제어기를 설계했다. 먼저 양방향 벡 부스트 컨버터의 제어전달함수를 구하고 이를 이용해 기존 설계법을 수정해가며 설계를 진행했다. 그리고 시뮬레이션을 통해 안정적인 DC link 전압이 출력되고 부하, 입·출력 전압, 충·방전모드 변화에도 높은 속응성을 가지는 것을 확인함으로써 설계과정 또한 타당하다는 것을 밝혔다. 향후 실제 실험을 통해 제어의 안정성을 검증할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Rick Zaitzu, "Voltage Mode Boost Converter Small Signal Control Loop Analysis Using the TPS61030" Texas Instruments, May. 2007.
- [2] Manish Bhardwaj, "Modeling Bi Directional buck/boost converter for digital control using C2000 Microcontrollers" Texas Instruments, Jan. 2015.