

벅 컨버터 소신호 모델링 분석 및 검증

장현웅, 이한빛, 정소영, 조성은, 조영훈
 건국대학교 전력전자 연구실

Buck Converter Small Signal Modeling Analysis and Verification

Hyun woong Jang, Hanvit Lee, Soyoung Jeong, Soungun Jo, Younghoon Cho,
 Konkuk Univ. KOPEL

ABSTRACT

본 논문에서는 스위칭 소자의 저항을 고려한 벅 컨버터의 소신호 모델링을 통해 회로를 등가화하고, 등가 모델의 동특성을 분석하였다. 또한 분석한 결과를 토대로 3P2Z(3Pole 2Zero) 제어기를 기반으로 한 전압 보상 제어기를 구현하였다. MATLAB을 이용하여 등가 모델을 바탕으로 설계한 제어기의 안정도를 판별 및 분석하였고, 최종적으로 PSIM을 사용한 시뮬레이션을 통해 분석한 결과가 타당함을 검증하였다.

1. 서 론

현재 전력전자의 많은 분야에서 DC/DC 컨버터가 쓰이고 있다. 기술이 발전하면서 보다 정교한 제어의 필요성이 늘고 있다. 그렇기 때문에 DC/DC 컨버터의 제어기를 설계하기 위해서 보다 정확한 모델이 필요하다. 스위치 저항과 다이오드의 저항이 실제 제어에 미치는 영향을 알아보기 위해 기존의 벅 컨버터 소신호 모델에 스위칭 소자의 저항을 추가하여 소신호 모델링을 할 것이다.

MATLAB을 이용하여 모델링한 시스템의 전달함수의 주파수를 분석하고, 이를 바탕으로 3P2Z 전압 제어기를 설계할 것이다. 설계한 전압 제어기의 검증을 위해 PSIM을 사용하여 시뮬레이션을 진행할 것이다.^[1]

2. 본 론

2.1 소신호 모델링

벅 컨버터의 스위칭 소자의 저항을 고려한 등가회로를 그림 1에 나타내었다.

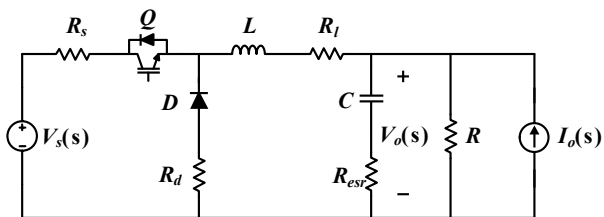


그림 1 스위치의 저항을 고려한 벅 컨버터 등가회로
 fig 1 Equivalent circuit of buck converter with switch resister

소신호 모델링을 위해 평균화(averaging)를 하여 스위칭 소자의 저항성분과 듀티비를 고려한 등가저항을 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{switch} = D^2 R_s + (1-D)^2 R_d \quad (1)$$

$$V_{loss} = I_L R_{switch} \quad (2)$$

(1)에서 R_s , R_d 는 각각 스위치와 다이오드의 저항을 나타낸다. (2)에서 R_{switch} 와 인덕터의 전류(I_L)를 곱하면 스위치에 의한 전압 손실이 된다.

스위칭 저항성분을 고려한 Power Stage 전달함수는 다음과 같고, 전달함수에 쓰이는 값들은 그 아래 나타내었다.

$$G_{vs}(s) \equiv \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_s(s)} = \alpha D \frac{1 + \frac{s}{\omega_{esr}}}{1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \frac{s^2}{\omega_o^2}} \quad (3)$$

$$G_{vd}(s) \equiv \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \alpha (V_s - V_{loss}) \frac{1 + \frac{s}{\omega_{esr}}}{1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \frac{s^2}{\omega_o^2}} \quad (4)$$

$$Z_p(s) \equiv \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{i}_o(s)} = R // R_l' \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{esr}}\right)}{1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \frac{s^2}{\omega_o^2}} \quad (5)$$

$$\left[\begin{array}{l} \omega_o = \sqrt{\frac{R + R_l'}{LC(R_{esr} + R)}} \quad \alpha = \frac{R}{R + R_l'} \quad \omega_{esr} = \frac{1}{CR_{esr}} \\ Q = \frac{1}{\omega_o} \cdot \frac{R + R_l'}{L + C(RR_l' + R_l'R_{esr} + R_{esr}R)} \\ R_l' = R_l + R_{switch} \quad \omega_z = \frac{R_l'}{L} \end{array} \right]$$

(3)은 입력전압과 출력전압, (4)는 듀티비와 출력전압, (5)는 출력 임피던스의 소신호 전달함수를 나타낸다. 스위칭 소자의 저항을 고려했을 때 벅 컨버터 내의 LC필터의 ω_o 는 증가하고, Q 는 감소한다는 사실을 확인할 수 있었다.

2.2 제어기 설계

전압 보상기를 설계하기 위해 3P2Z 제어기를 설계하였다. 이 제어기는 아날로그 회로의 전달함수를 바탕으로 구상했고, MATLAB을 통해서 페루프 이득 전달함수 $T_m(s)$ 의 안정도를 판별하였다. 제어기 설계에 사용된 Power Stage 소자의 값은 다음과 같다.

표 1 Power Stage에 사용된 소자 parameter
Table 1 Values of the Power Stage Parameters

V_s	300V	V_o	200V
R_s	22.5m Ω	R_d	43m Ω
L	1mH	R_l	0.9 Ω
C	1mF	R_{esr}	1.59m Ω
R	50 Ω	$\omega_s (= 2\pi f_{sw})$	2 π *20k

전압 보상기의 전달함수는 (6)에 나타내었다.

$$F_v(s) = \frac{K_v \left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)} \quad (6)$$

페루프 이득 전달함수 $T_m(s)$ 은 (7)에 나타내었고, $T_m(s)$ 의 이득 K 는 (8)로 나타내었다. K 는 충분한 대역폭을 확보하기 위해서 교차주파수 ω_c 가 $0.1\omega_s$ 와 $0.3\omega_s$ 의 사이에 위치하도록 선정하였다.

$$T_m(s) = \frac{K \left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{z2}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{esr}}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \frac{s^2}{\omega_o^2}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)} \quad (7)$$

$$K = K_v \frac{R}{R + R_l} (V_s - V_{loss}) \quad (8)$$

출력 커패시터의 esr(equivalent series resistance)은 전압 제어기의 과도상태 특성에 악영향을 미친다. 때문에 전압 보상기의 극점에 $\omega_{p1} = \omega_{esr}$ 으로 정했다. ω_{z1} 이 큰 값을 가질수록 입력전압에 대한 과도상태 응답속도가 빨라지지만, 시스템이 조건부 안정이 되는 것을 방지하기 위해 ω_{z1} 은 ω_o 보다 작은 값을 가져야 한다. 그러므로 $\omega_{z1} = 0.8\omega_o$ 로 설정하였다. ω_{z2} 또한 충분한 위상 여유를 확보하는 데 목적이 있다.^[2] ω_{z2} 가 큰 값을 가질수록 부하 변동에 대한 과도상태 응답속도가 빨라지지만, ω_{z2} 가 너무 크면 ω_c 에서의 위상 여유가 작아지기 때문에 $\omega_{z2} = 3\omega_o$ 로 설정하였다. 그 후 고주파 노이즈를 줄이기 위해서 $\omega_{p2} = 0.8\omega_s$ 로 설정하였다. 이러한 조건을 충족하는 T_m 는 (9)에 나타내었다.

$$T_m(s) = \frac{K \left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \frac{s^2}{\omega_o^2}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)} \quad (9)$$

MATLAB을 이용해서 $T_m(s)$ 의 안정도를 판별 및 분석한 결과를 그림2에 나타내었다.

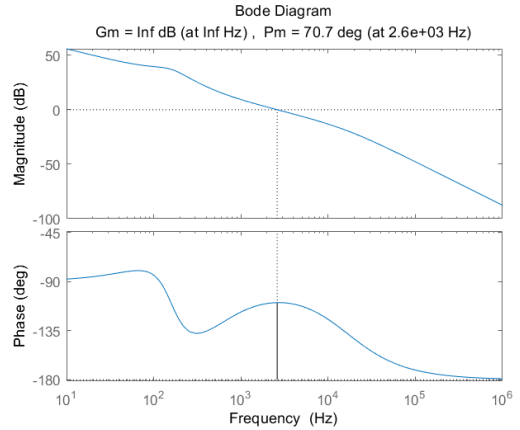


그림 2 전압 보상 회로의 보드선도
fig 2 Bode plot of voltage compensation circuit

2.3 시뮬레이션

시뮬레이션은 PSIM을 이용해서 진행하였다. 입력 전압이 변화했을 때 출력 전압과 부하 전류의 파형을 살펴보았다. 시뮬레이션 결과는 그림3에 나타내었다.^[2]

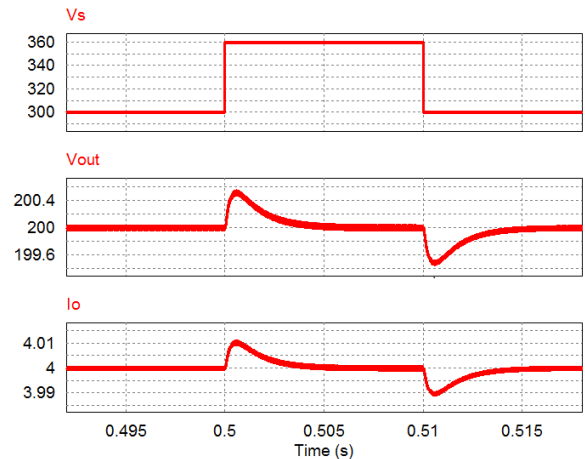


그림 3 시뮬레이션 결과 파형
fig 3 Simulation result waveforms

3. 결론

본 논문에서는 스위치의 저항을 고려한 소신호 등가모델을 구하고, 동특성을 분석하였다. 분석된 결과를 바탕으로 전압 제어기를 설계하고 제어기의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해서 입증하였고, 추후 실험을 통해서 검증할 계획이다.

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 산업연계 교육활성화선도대학(PRIME) 사업에서 지원을 받아 수행된 연구임

참고 문헌

- [1] Byungcho Choi. Fundamentals of PWM Dc to Dc Power Conversion, 가디언북, 2015
- [2] M. F. N. Tajuddin and N. Abdul Rahim, "Small signal AC modeling technique of Buck converter with DSP based Proportional Integral Derivative (PID) controller," 2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications, Kuala Lumpur, 2009, pp. 904-909.