

평균모델링을 이용한 DC-DC컨버터의 간략화된 제어기 설계

조영찬, 신덕식
전자부품연구원

Simplified Controller Design Method Using Average Model for DC-DC Converter

Young-Chan Cho, Duck-Shick Shin
Korea Electronics Technology Institute

ABSTRACT

연속도통모드의 DC-DC컨버터 제어기 설계에 있어 평균모델링 기법은 복잡한 수식 전개 및 해석의 수고로움 없이 비교적 간단한 기법으로 원하는 제어기 성능을 얻어낼 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 논문은 평균모델링 기법을 이용하여 3가지 종류의 DC-DC컨버터의 제어기를 설계하는 기법을 제시하고 성능의 타당성을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

1. 서론

신재생 에너지의 확대 및 전기자동차의 상용화 등 전력변환 기기에 대한 개발 및 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그중, 직류용 전력변환기인 DC-DC컨버터는 BMS(Battery Management System), 태양광 컨버터, 차량용 DC용 전력변환기(LDC, HDC) 등 다양한 분야에서 채택을 하고 있다.

일반적으로 연속도통모드의 DC-DC컨버터의 제어기를 설계하는 방법은 평균모델 및 소신호 기법을 이용하여 전달함수를 구하고 이에 맞는 비례적분 제어기를 설계하여 z-domain으로 변환하는 다소 복잡한 과정을 거쳐야 한다^[1]. 더욱이 인덕터의 값이나 스위칭 주파수 등 파라미터가 변경 되거나 제어기의 대역폭을 조정하는데 있어 앞의 동일한 과정을 반복적으로 거쳐야 하는 수고로움이 발생하였다. 한편 평균모델링 기법은 전압 성분들을 전항보상으로 상쇄하여 전달함수를 1차 저역필터 형태로 만들어 극점 및 영점 상쇄를 이용하여 비교적 간편하게 원하는 대역폭의 제어기 설계가 가능한 장점이 있다^{[2][3]}.

본 논문에서는 Buck, Boost, Buck-Boost 3가지 형태의 DC-DC 컨버터의 연속도통모드 제어기 설계를 평균모델링 기법을 이용하여 설계하는 방법을 제시하였다. 관련 설계 수식 또한 제시하여 비교적 간편한 방법으로 원하는 성능의 제어기를 설계 할 수 있도록 하였다. 기법의 타당성은 부스트 컨버터를 이용한 시뮬레이션을 통하여 검증 하였다.

2. 평균모델링 기법을 이용한 제어기 설계

2.1 Boost Converter의 전류제어기 설계

그림1의 Boost Converter에 대한 인덕터의 전압에 대한 평균모델은 수식(1)과 같이 표현할 수 있다^[4].

$$v_L = dv_i + (1-d)(v_i - v_o) = v_i - v_o(1-d) \quad (1)$$

식(1)에서 각각 v_L , v_i , v_o 는 인덕터와 입출력 전압, d 는 스위

치의 시비율이다. 위의 관계식에서 인덕터 전압외의 전압들을 피드포워드 형태로 제거 한다면 시비율과 인덕터 전압에 대한 관계식으로 나타 낼 수 있다. 즉, 전류제어기 출력에 피드포워드를 이용하여 인덕터 전압외의 성분을 제거한 출력은 인덕터 지령 전압이 되고 ESR을 포함한 인덕터의 전압전류 방정식에 따라 그림2와 같은 전류 제어기 블록도로 나타낼 수 있다^[3].

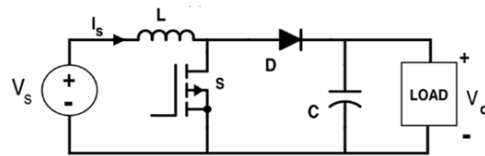


그림 1 Boost Converter의 구조
Fig. 1 Boost Converter Topology

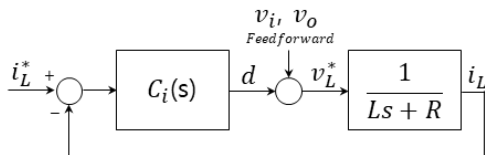


그림 2 평균모델링 전류제어 블록도
Fig. 2 Block diagram of Average Model based Current Controller

또한, 전류제어기를 플랜트의 전달함수의 극점을 제거하도록 인덕터와 ESR값을 산정하여 비례 적분제어기 $C_i(s)$ 를 수식(2)와 같이 설계하면,

$$C_i(s) = \frac{k_p s + k_i}{s} = \frac{\omega_{bw}(\hat{L}s + \hat{R})}{s} \quad (2)$$

개루프 전달함수 $L(s)$ 는 수식(3)과 같이 간단한 적분기 형태로 구할 수 있고 ω_{bw} 는 폐루프 전달함수에서 제어기의 대역폭으로 표현 가능하다.

$$L(s) = \frac{\omega_{bw}(\hat{L}s + \hat{R})}{s} \frac{1}{Ls + R} = \frac{\omega_{bw}}{s} \quad (3)$$

따라서, 비례적분제어기의 계수 k_p , k_i 를 수식(4)와 같이 설정하면 ω_{bw} 의 대역폭을 갖는 전류제어기를 설계 할 수 있다.

$$k_p = \hat{L}\omega_{bw}, \quad k_i = \hat{R}\omega_{bw} \quad (4)$$

2.2 Boost Converter의 전압제어기 설계

전압제어기도 비슷한 방법인 커패시터에 대한 전압전류 방정식으로 설계할 수 있다. 전류제어기는 전압제어기와 비교하여 충분히 빠르게 설계를 하므로 전압제어기 설계 대역에서는 그 효과를 무시할 수 있다. 따라서 그림3과 같은 블록도로 표현 가능하다.

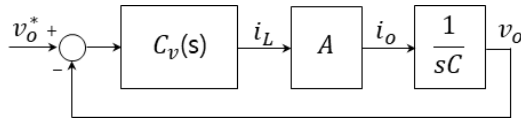


그림 3 전압제어 블록도
Fig. 3 Block diagram of Voltage Controller

계수 A 는 입출력제어 여부 혹은 컨버터의 종류에 따라 변화한다. Boost Converter의 출력전압 제어를 예로 들면 A 계수는 $1-d$ 인데, 동작영역에 따라 그 값을 적절히 선정하거나 추종해야 한다. 또한, 비례적분제어기의 영점이 전압제어기 전체의 대역폭보다 충분히 작다고 가정하면 비례계수만 영향을 주게 된다. 따라서 개루프 전달함수 $L_v(s)$ 는 수식(5)와 적분형태가 되고, 수식(6)에서 앞의 전류제어기와 마찬가지로 ω_{bw_v} 는 전체 전압제어기의 대역폭이 된다(편의상 계수 A 를 제외하고 전개).

$$L_v(s) = (k_p + \frac{k_i}{s}) (\frac{1}{sC}) \approx \frac{k_p}{sC} \quad (5)$$

$$L_v(s) \approx \frac{k_p}{sC} = \frac{\omega_{bw_v}}{s} (k_p = \omega_{bw_v} \hat{C}) \quad (6)$$

k_i 계수는 가정했던 비례적분제어기의 영점 ω_{zero} 과 전체 전압제어기의 대역폭 ω_{bw_v} 조건에 따라(7)같이 선정 가능하다.

$$\omega_{zero} = \frac{k_i}{k_p} = \frac{\omega_{bw_v}}{k_d} (\omega_{zero} \ll \omega_{bw_v}) \quad (7)$$

k_d 는 대역폭의 비교계수로 보통 5이상 선정해야 적분제어기의 효과가 무시가능하다^[5]. 수식(6)과 (7) 정리하면 비례적분제어기의 계수 k_p , k_i 를 수식(8)와 같은 조건식을 선정할 수 있다.

$$k_p = \omega_{bw_v} \hat{C}, k_i = \frac{\omega_{bw_v}}{k_d} k_p (k_d \geq 5) \quad (8)$$

2.3 평균모델을 이용한 Buck, Boost, Buck-Boost Converter 제어기 설계 관계식

표1은 앞서 설명한 Boost Converter의 제어기 설계와 동일한 방법으로 다른 두 가지의 컨버터에도 적용하여 정리한 표이다. 전압 및 전류제어기의 비례적분계수 k_p , k_i 는 비교적 간단한 동일 수식으로 구현 가능하다. 다만, 2.2에서 살펴본 전압제어기의 경우 입출력제어 여부와 컨버터의 종류에 따라 A 계수를 적절하게 선정 혹은 추종해야 원하는 성능을 얻을 수 있다.

표 1 각 컨버터에 대한 제어기 설계 관계식
Table 1 Equation for design controller for DC-DC Converter

Type	Duty Equation	Current Controller		Voltage Controller	
		k_p	k_i	k_p	k_i
Buck	$\frac{v_L + v_o}{v_i}$	$\omega_{bw} \hat{L}$	$\omega_{bw} \hat{R}$	$\omega_{bw} \hat{C} A$	$\frac{\omega_{bw_v}}{k_d} k_p A$ ($k_d \geq 5$)
Boost	$\frac{v_L - v_i}{v_o} + 1$				
Buck-Boost	$\frac{v_L + v_o}{v_i + v_o}$				

3. 시뮬레이션 검증

앞서 살펴본 Boost Converter에 대한 시뮬레이션을 진행 하였다. Backward 변환을 이용하여 디지털 제어기를 구현하였고, 표1의 수식을 이용하여 각각 다른 대역폭의 제어기를 설계하여 전류 및 전압제어기 계단 응답을 확인하였다. 스위칭 주파수는

20kHz이고 각 제어기의 대역폭은 이보다 충분히 작게 선정하였다. 그 결과 안정도를 확보하였고, 대역폭 감소에 Settling Time 변화의 추이가 예상대로 동일한 것을 확인할 수 있었다.

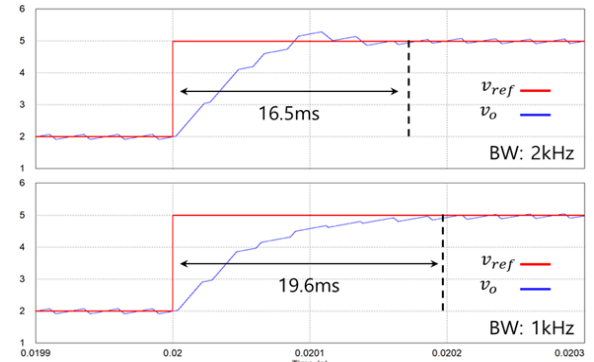


그림 4 전류제어기 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulation Result of Current Controller

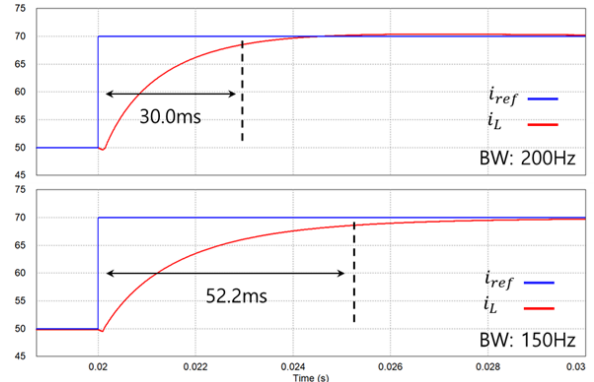


그림 5 전압제어기 시뮬레이션 결과(전류제어 대역폭:2kHz)
Fig. 5 Simulation Result of Voltage Controller

4. 결론

본 논문은 평균모델링 기법을 이용한 DC-DC Converter의 전압 및 전류 제어기 설계에 대해 다루어 보았다. 다소 복잡한 과정을 거쳐야 했던 제어기 설계과정을 간단한 수식으로 간소화 할 수 있었고 유효성을 시뮬레이션을 통하여 검증 하였다. 하지만, 연속도통모드와 비절연형 컨버터에서만 적용 되는 한계가 존재 하므로 향후 관련한 추가 연구가 필요할 것이다.

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 경제협력권산업 육성사업(R0005633)으로 수행된 연구결과임.

참고 문헌

- [1] 최석재, 김동명, 김수한, 최병조. "양방향 배터리 충방전 컨버터의 소신호 해석과 제어기 설계." 전력전자학회논문집, (2011.7): 177-178.
- [2] Seung-Ki Sul, Control of Electric Machine Drive Systems, John Wiley & Sons, New Jersey, 2011
- [3] 이광운. "DSP를 이용한 부스트 컨버터의 전류 제어기 설계 및 구현." 전력전자학회논문지, 17.3 (2012.6): 259-265.
- [4] Fundamentals of Power Electronics / Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic. 2nd ed. 2011
- [5] 이광운. "평균 모델을 이용한 Z-소스 인버터의 제어." 전력전자학회논문지, 19.3 (2014.6): 290-296.