

1차 지연 특성을 갖는 전류 제어기의 이득 설계 비교

이진우

두원공과대학교 전기공학과

Comparisons of gain design of the current controller with the first order lag characteristics

Jin-Woo Lee

Doowon Technical University College, Dept. of Electrical Engineering

ABSTRACT

This paper deals with the comparisons of gain design of current controller with the first order lag characteristics. Usually the current controller for motor drives and PCSs has the first order lag characteristics to avoid the current overshoot. This paper suggests a new inductor current controller for the PCSs and also compares with other two current controllers. The simulation results show that the proposed design method also gives the first order lag characteristics and can be used as an alternative current controller for PCSs.

1. 서론

PWM 인버터와 PWM 컨버터 등의 전압원 특성을 갖는 전력 변환장치에서 제어 성능 구현 측면에서 가장 기본적인 요소인 전류제어기에 대하여 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 전동기 구동장치에서 전류 제어기는 전동기의 운전 특성을 결정하는 중요한 요소로서 역기전력 전향 보상과 상호간섭항을 제거하는 동기 좌표계 PI 제어기와 복소수 벡터 전류 제어기 등이 널리 사용되고 있다. 계통 연계형 PCS(Power Conditioning System) 등의 정지형 전력변환장치도 유사한 전류제어기를 적용하고 있는 추세이다. 이러한 전류제어기는 기본적으로 1차 지연 응답 특성을 갖도록 PI제어기의 이득을 설계하고 있으며, 이상적인 경우에는 오버 슈트 없는 빠른 전류 제어 응답을 갖기 때문에 산업체 등에서 광범위하게 적용되고 있다.^[1,2]

본 논문에서는 기존의 전류 제어기 설계 방법을 분석하고, PCS와 같이 인덕터의 전류 제어를 필요로 하는 경우에 적용이 가능한 새로운 전류 제어기의 이득 설계 방법을 제시하고, 시뮬레이션을 통하여 제안한 방법의 유효성을 보이고자 한다.

2. 전류 제어기 이득 설계 비교

전동기 구동장치 및 PCS에서 전류 제어를 위한 동기좌표계 PI 제어기 설계는 최종적으로 저항과 인덕턴스를 갖는 회로에 대한 전류 제어 문제로 귀결된다. 전동기 제어의 경우에는 일반적으로 전동기의 저항을 항상 고려하여 설계하여야 한다. 그러나 PCS의 경우는 인덕터를 사용하는 경우에 저항 값이 매우 작아서 무시할 수 있기 때문에 순수한 인덕턴스만 있는 경우로 볼 수 있다.

그림 1은 RL 회로에 대한 PI 전류 제어기 블록 선도를 나타낸다. 전류에 대한 폐 루프 전달 함수는 식 (1)과 같으며, 기존의 극점-영점 상쇄 기법의 전류 제어기 이득설계에서는 식 (2)

와 같이 PI제어기 이득을 각각 설계한다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (3)과 같고, 극점-영점 상쇄에 의하여 최종적인 폐 루프 전달 함수는 식 (4)와 같이 되며, 1차 지연 특성을 가지기 때문에 오버 슈트가 없고, 응답속도는 차단 각 주파수에 의해 결정됨을 알 수 있다.

$$\frac{i}{i^*} = \frac{K_p s + K_i}{Ls^2 + (K_p + R)s + K_i} \quad (1)$$

$$K_p = L\omega_c, \quad K_i = R\omega_c \quad (2)$$

$$\frac{i}{i^*} = \frac{(Ls+R)\omega_c}{(Ls+R)(s+\omega_c)} \quad (3)$$

$$\frac{i}{i^*} = \frac{\omega_c}{s+\omega_c} \quad (4)$$

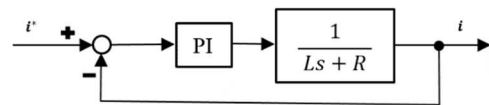


그림 1 RL 회로에 대한 PI 전류 제어기 블록 선도

한편 저항이 없는 경우는 식(1)에서 저항을 영으로 두고 적분기 없이 비례제어기만 적용하면 식 (5)와 같이 되어 식(4)와 같음을 알 수 있으며, 위와 같은 개념에서 비례 이득을 식 (6)과 선정할 수 있다.

$$\frac{i}{i^*} = \frac{K_p}{Ls + K_p} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (5)$$

$$K_p = L\omega_c \quad (6)$$

반면에 그림 1에서 저항이 없는 회로에 PI 제어기를 사용하는 경우에는 식 (7)과 같이 되고, 이를 정리하면 식 (8) 및 식 (9)와 같이 되어 직접적으로 극점-영점 상쇄 기법을 적용할 수 없다.

$$\frac{i}{i^*} = \frac{K_p s + K_i}{Ls^2 + K_p s + K_i} \quad (7)$$

$$\frac{i}{i^*} = \frac{(K_p/L)s + K_i/L}{s^2 + (K_p/L)s + K_i/L} = \frac{2\omega_c s + \omega_c^2}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2} \quad (8)$$

$$\frac{i}{i^*} = \frac{\omega_c(2s+\omega_c)}{(s+\omega_c)^2} \quad (9)$$

$$\frac{i}{i^*} = \frac{\omega_c(s+\omega_c)}{(s+\omega_c)^2} = \frac{\omega_c}{s+\omega_c} \quad (10)$$

$$K_p = 2L\omega_c, \quad K_i = L\omega_c^2 \quad (11)$$

그러나 전류 기준치에 해당하는 분자의 비례 제어기 이득을 1/2배로 설계한다면 식 (9)가 식 (10)과 같이 변경되어 극점-영점 상쇄 기법을 적용하는 것이 가능하다. 식 (10)은 앞에서 얻은 식 (4) 및 (5)와 같으며, 이득은 식 (11)과 같이 구할 수 있고, 위의 식 (4) 및 (5)에서 적용한 개념인 차단주파수를 사용하여 이득 설계가 가능함을 알 수 있다.

위의 식 (10)과 같이 분자의 비례 제어기 이득을 설계하는 것을 다시 정리하여 나타내면 식 (12)와 같다. 이를 변경하면 식 (13)을 얻을 수 있고 블록 선도로 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2는 속도제어기로 적용되는 PI 제어와 IP 제어의 혼합 제어기의 형태로서 $\alpha = 0.5$ 인 경우에 해당하며, 다른 측면으로는 PI 제어에 상태 피드백 제어를 추가한 형태로 볼 수 있다. 식 (11)과 같이 이득을 설계하면 적분기의 이득을 식 (2)와 다르게 설계할 수 있으며, 저항이 없는 경우에도 PI 제어기를 적용하여 전류 제어 오차를 안정적으로 제거할 수 있음을 알 수 있다.

$$u = (K_p/2)i^* - K_p i + (K_i/s)(i^* - i) \quad (12)$$

$$u = (K_p/2)(i^* - i) + (K_i/s)(i^* - i) - (K_p/2)i \quad (13)$$

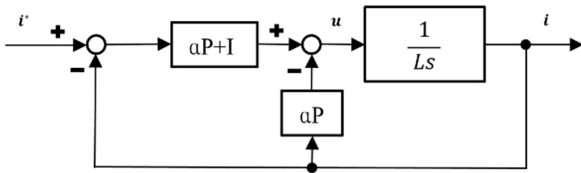


그림 2 제안한 L 회로에 대한 전류 제어기 블록 선도

3. 모의 실험 결과

제안한 새로운 전류 제어기의 특성을 검증하기 위하여 모의 실험에 사용한 상수는 표 1과 같다. 비례 적분 제어기 이득은 각각 식 (11)을 이용하여 계산하며, 이산 시간 응답을 확인하기 위한 샘플링 주파수는 PWM 주파수와 같게 하였다.

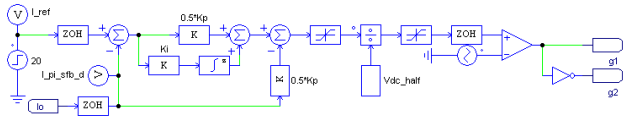
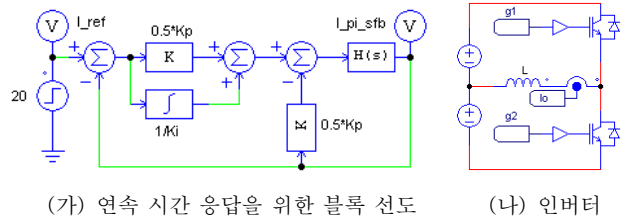
그림 3은 모의 실험을 위한 블록 선도와 전류 파형을 각각 보여 준다. 그림 3 (가)는 제안한 전류 제어기의 응답을 연속 시간 영역에서 확인하기 위한 블록 선도이며, 응답 전류 파형은 그림 3 (라)의 L_{pi_sfb}로 나타낸 파형으로 식 (10)의 1차 지연 특성을 나타낼 수 있다. 그림 3 (나) 및 (다)는 제안한 전류 제어기의 응답을 이산 시간 영역에서 확인하기 위한 인버터와 제어 블록 선도이며, 연속 시간 응답과의 비교를 위하여 이산 시간 지연이 없는 경우를 나타내고 있다. 응답 전류 파형은 그림 3 (라)의 L_{pi_sfb_d}로 나타낸 파형으로 연속 시간 응답 특성과 같이 식 (10)의 1차 지연 특성을 나타낼 수 있다.

그림 3 (라)의 L_{pi} 및 L_{pi_d}로 나타낸 응답 전류 파형은 식 (9)에 대한 연속 및 이산 시간 응답 특성으로서 전달함수의 영점에 의한 오버 슈트가 발생함을 알 수 있다.

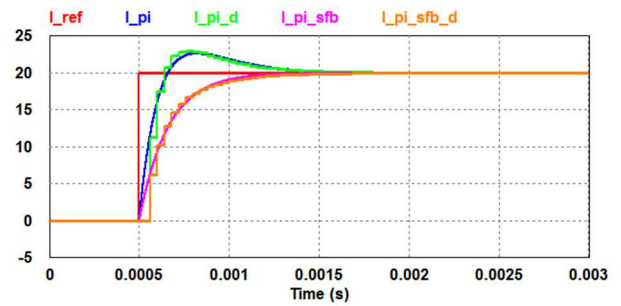
제안한 방법을 사용하면 인덕터 전류 제어에서 오버 슈트 없는 1차 지연 응답 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

표 1 모의 실험 상수

| L | f _c | f _{sw} |
|-------|----------------|-----------------|
| 0.2mH | 1000Hz | 25kHz |



(다) PWM 제어 블록 선도



(라) 전류제어 응답 특성

그림 3 전류 제어 모의 실험 블록 선도와 전류 파형(5A/div)

4. 결론

본 논문에서는 인덕터 전류 제어가 필요한 PCS와 같은 경우에 적용할 수 있는 오버 슈트 없는 전류 제어 특성을 가진 전류 제어기를 제안하고 모의 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

제안한 방법은 오차에 대하여 비례 적분 제어기를 사용하는 경우에 극점-영점 상쇄 기법을 적용할 수 있도록 비례 제어기 이득의 1/2을 상태 피드백 제어에 적용하여 폐 루프 전달 함수가 1차 지연 특성을 갖도록 하였다.

참고 문헌

- [1] 설승기, '전기기기 제어론', 홍릉과학출판사, 2007.
- [2] 김상훈, '모터 제어 - DC, AC, BLDC', 복두출판사, 2014.