IPMSM의 위치제어를 위한 PI-PD 제어기 설계

장주형, 김상훈
강원대학교 전기전자공학과

A PI-PD Controller Design for Position Control of an IPMSM

Ju Hyeong Jang, Sang Hoon Kim
Kangwon National University

ABSTRACT

본 논문은 위치, 속도, 전류 제어기들이 직렬로 연결된 전동기 구동시스템에서 속도 제어기를 사용하지 않는 위치 제어를 위한 PI PD 제어기 설계법을 제안한다. 기존의 PI PD 위치 제어기 설계법과 달리 제안된 제어기의 설계법은 위치 제어기의 대역폭에 따라 이득 값을 설정할 수 있다. 제안된 위치 제어기 설계 성능을 검증하기 위해 IPMSM 구동시스템에서 실험을 통해 유효성을 확인하였다.

1. 서론

통상적으로 정밀제어가 요구되는 분야에서 위치 제어시스템은 P(Proportional) 제어기 혹은 PI(Pro portional Integral) 제어기로 구성된 위치 제어기와 내부 루프(Inner Loop)의 PI 속도 제어기 그리고 전류 제어기가 직렬로 연결된 직렬 제어(cascade control) 구조의 위치 제어루프를 많이 사용한다. 이러한 제어 구조는 각각의 제어기를 독립적으로 운용할 수 있기 때문에 이득 설정이 비교적 간단하다[1]. 그러나 이러한 방식은 연산 수행시간이 길어지며, 결과적으로 바깥 측 루프(Outer Loop)의 동특성이 떨어지는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하고자 내부 루프에 해당하는 속도 또는 전류 제어기를 사용하지 않음으로써 시스템의 동특성을 개선하는 형태의 위치 제어기에 관한 연구가 이루어지고 있다[2].

본 논문의 위치 제어시스템에서는 내부 루프인 속도 제어기를 사용하지 않고 위치 제어기를 전류 제어기에 직접 연결하는 구조를 사용한다. 이 구조에서는 속도 제어기를 사용하지 않기 때문에 위치 제어기의 출력을 직접 연결하여 시스템의 동특성을 높이고 연산 부담을 감소시킬 수 있다. 이러한 위치 제어시스템에 적용시키기 위해 본 논문에서는 PI PD 위치 제어기의 설계법을 제시한다. 기존의 PI PD 제어기 설계법은 PI 제어기의 비례 이득 값에 의해 PI 제어기의 적분 이득값과 PD 제어기의 비례 및 미분 이득 값을 결정된다[3],[4]. 이 경우 위치 제어시스템의 제어 대역폭을 설정하기 힘들다는 문제가 있다.

본 논문은 PI PD 위치 제어기의 이득이 대역폭에 따라 결정되도록 간단한 설계법을 제안한다..

2. 제안한 PI-PD 위치 제어기 설계

그림 1은 속도제어기가 없는 PI PD 위치 제어시스템의 블록도를 나타낸다.

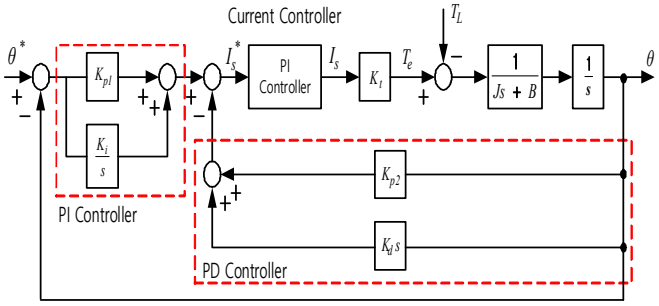

그림 1. 제안한 PI-PD 위치 제어시스템의 블록도

그림 1에서 θ^*와 θ는 지령 위치와 실제 위치이고 I_s^*와 I_s는 지령 전류와 실제 전류이다. 위치제어기는 주 오차 제어기인 PI 제어기와 내부 궤환 제어기인 PD 제어를 나타낸다. PI 전류 제어기는 위치 제어계가 동작하는 범위 내에서 전류 제어계의 전달함수가 이득 1로 동작한다고 가정한다. 기계 시스템에서 T_e는 전동기에서 발생된 토크이며, T_L은 부하 토크를 나타낸다. 또한 K_t는 전동기의 토크상수이며, J는 전체 시스템의 관성 모멘트와 B는 마찰 계수이다. 마찰 계수 B는 부하토크 T_L에 포함시켜 무시한다면 위치 제어시스템의 폐루프 전달함수 $G(s)$는 식 (1)과 같다.

$$G(s) = \frac{\theta}{\theta^*} = K_m K_{p1} \times \frac{(s + K_i/K_{p1})}{s^3 + K_m K_d s^2 + K_m(K_{p1} + K_{p2})s + K_m K_i} \quad (1)$$

여기서, K_{p1}, K_i는 비례 적분(PI) 제어기의 비례 및 적분계수 그리고 K_{p2}, K_d는 비례 미분(PD) 제어기의 비례 및 미분계수이다. K_m은 K_t/J를 나타낸다.

식 (1)과 같이 만들어 주기 위해 기본형 2차 전달함수를 식 (2)처럼 표현될 수 있다.

$$G(s) = \frac{(s+\omega_{pi})\omega_n^2}{(s+\omega_{pi})(s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2)} = \frac{(s+\omega_{pi})\omega_n^2}{s^3+(2\zeta\omega_n+\omega_{pi})s^2+(\omega_n^2+2\zeta\omega_n\omega_{pi})s+\omega_n^2\omega_{pi}} \quad (2)$$

식 (2)가 식 (1)과 같다면 극점 영점 상쇄(Pole Zero Cancellation) 기법을 통하여 PI PD 위치 제어기의 전달함수는 2차 전달함수가 된다. 위 식에서 ζ는 감쇠비(Damping Ratio)이고, ω_n은 비감쇠 고유 진동수(Undamped Natural Frequency)이다. $\omega_{pi}(=K_i/K_{p1})$는 PI 절점주파수(Corner Frequency)를 나타낸다. 식 (1)과 (2)를 비교하여 식 (3)의 관계식을 구할 수 있다.

$$K_m K_{p1} = \omega_n^2, \quad K_m K_i = \omega_n^2 \omega_{pi}$$
$$K_m (K_{p1} + K_{p2}) = \omega_n^2 + 2\zeta\omega_n\omega_{pi} \tag{3}$$
$$K_m K_d = 2\zeta\omega_n + \omega_{pi}$$

따라서 식 (3)의 관계식으로부터 PI PD 위치 제어기의 이득을 구할 수 있다. 이때 ζ를 $1/\sqrt{2}$로 선정하면 ω_n은 위치 제어기의 대역폭 ω_{pc}가 되고, 이득 값들은 아래의 식으로 표현된다.

$$K_{p1} = \omega_{pc}^2/K_m, \quad K_i = K_{p1}\omega_{pi} = K_{p1}\frac{\omega_{pc}}{\alpha},$$
$$K_{p2} = \frac{\sqrt{2}\,\omega_{pc}K_i/K_{p1}}{K_m}, \; K_d = \frac{\sqrt{2}\,\omega_{pc} + K_i/K_{p1}}{K_m} \tag{4}$$

여기서, 식 (4)에서 K_i의 ω_{pc}/α는 PI 절점 주파수$(=K_i/K_{p1})$에 해당한다. ω_{pi}를 너무 작게 선정하면 정상상태 특성이 저하되며, 너무 크게 선정하면 오버슈트가 발생하기 때문에 적절한 α값을 선정해야한다.

3. 실 험 결 과

제안된 PI PD 위치 제어기 설계 성능을 검증하기 위해 IPMSM 구동시스템에서 실시하였다. 제어부는 TI(Texas Instrument)사의 고성능 32bit DSC(Digital Signal Controller)인 TMS320F28335를 이용하여 디지털 제어기를 구현하였다. 전력 변환부는 다이오드 정류기와 IGBT 인버터 등으로 구성되었다. 사용된 인버터의 스위칭 주파수는 5kHz이며, 100us의 샘플링 주기마다 전류제어를 수행한다. 속도와 위치 정보는 2000PPR의 엔코더를 이용하여 얻는다.

그림 2와 3은 지령 60°에서 대역폭 ω_{pc}에 따른 응답특성을 나타는데, 대역폭이 클수록 응답속도가 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 제어이득이 ω_{pc}가 45rad/s로 설정하였을 때, 초기위치 0°에서 60°로, 60°에서 120°로 인가 후 0°로 복귀시킨 응답특성을 나타낸다. 위치 지령에 따라 위치 제어의 추종성이 좋은 것을 확인할 수 있다.

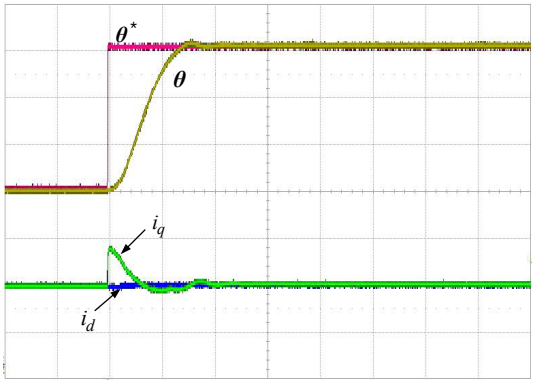

그림 2. 대역폭 $\omega_{pc}=30rad/s$에 대한 응답특성

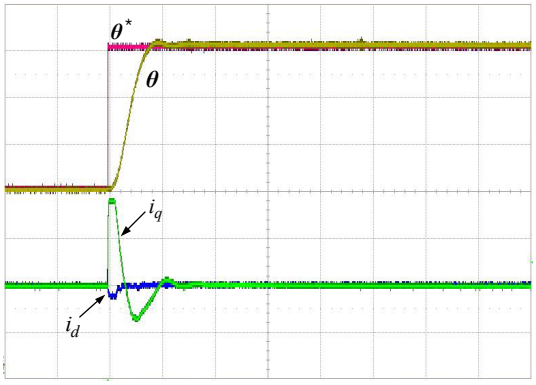

그림 3. 대역폭 $\omega_{pc}=60rad/s$에 대한 응답특성

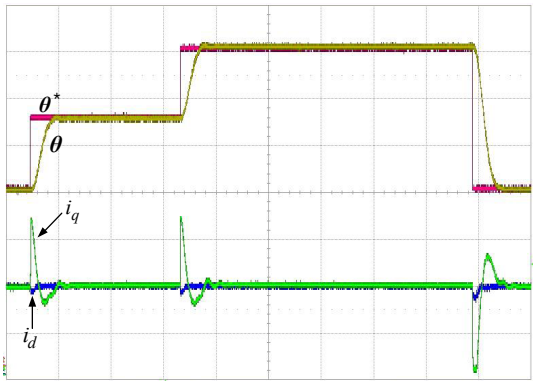

그림 4. 위치 지령에 따른 응답 특성

4. 결론

본 논문에서는 속도 제어기를 사용하지 않는 위치 제어시스템에서 PI PD 위치 제어기의 설계법을 제안하였다. 제안한 방법은 전체 위치 제어시스템을 극점 영점 상쇄 기법을 통하여 기본형 2차 전달함수 형태로 구성되도록 설계하였고, 제어기의 이득 값들이 제어대상의 전달함수 및 위치 제어기의 대역폭에 따라 결정되도록 하였다. 제안된 설계 방법에 의한 PI PD 위치 제어시스템을 IPMSM에 적용하여 실험을 통해 제안하는 제어기법의 타당성을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] G.Ellis, “Control System Design Guide Using Your Computer to Understand And Diagnose Feedback Controllers”, Arcademic Press, 2000.

[2] T.Umeno and Y.Hori, “Robust Servosystem Design with Two Degrees of Freedom and its Application to Novel Motion Control of Robot Manipulators”, *Tran. of IEEE*, Vol.40, NO.5, pp473 485, 1993.

[3] Jong Hyeok Kim. "Design of PI PD Controllers to Improve a Response Characteristic in Position Control System." *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 21.4, pp651 657, 2012.

[4] I.Kaya, “A PI PD controller design for control of unstable and integrating processes” *ISA Transactions*, Vol 42, pp111 121, 2003.