

선회구동시스템의 시스템 식별과 최단시간 강인제어에 관한 연구

이재호*, 이성우**, 최재형**, 오동진***, 김일한***, 박기현*
 성균관대학교*, 국방과학연구소**, 현대로템주식회사***

System Identification and Robust Time-Optimal Control of the Rotational Driving System

Jea-Ho Lee*, Seong-Woo Lee**, Jae-Hyung Choi**, Dong-Jin Oh***, Il-Han Kim***, Ki-Heon Park*
 Sungkyunkwan University*, Agency for Defense Development**, Hyundai Rotem Company***

Abstract - 본 논문의 목적은 선회구동장치의 최단시간으로 외란 및 시스템 불확실성에 강인한 구동을 위한 최단시간 강인제어기를 설계하는 것이다. 먼저 선회구동장치의 시스템 식별을 통해 플랜트의 전달함수를 유도하고 얻어진 전달함수를 이용하여 High-gain PDC와 RNTOC의 스위칭 함수를 정의한다. 그리고 각각의 제어 법칙을 적용하여 제어기를 설계한다. 두 제어기의 제어 성능을 시뮬레이션 및 실험으로 입증한다.

1. 서 론

선회구동장치의 구동을 위한 여러 가지 제어기 가운데 고전적인 PID 제어기는 오버슈트 없이 최단시간으로 초기위치에서 목표치까지 구동하기 어렵다. 이와 같은 제어 목적을 충족시킬 수 있는 최단시간 제어기(time-optimal controller)와 외란과 측정 잡음 그리고 모델에 불확실성에 강인한 강인 제어기(robust controller)가 혼합된 제어기가 필요하다. 지금까지 연구된 선형 최적제어 알고리즘으로는 LQR(linear quadratic regulator), LQG(linear quadratic gaussian), 그리고 BBC(bang-bang control)이 있으며, 강인제어기로는 대표적으로 H_{∞} 선형 강인 제어, 그리고 비선형 강인 제어기인 SMC(sliding mode control)등이 있다.

본 논문에서는 선회구동장치의 위치제어기로 사용되는 최단시간 강인 제어기는 시스템의 빠른 응답특성을 잘 반영하는 BBC(bang-bang control)의 장점과 시스템의 불확실성과 외란 및 측정 잡음 등 비선형성에 강인한 SMC(sliding mode control)의 장점만을 이용한 혼합제어기의 형태인 High-gain PD 제어기[1]와 RNTOC(robust near time-optimal controller)[2]를 이용한다. 최단시간 강인제어기를 이용하여 구동제어를 수행하기 위해서는 High-gain PD 제어기와 RNTOC에서 시스템의 동적 특성을 나타내는 스위칭 함수(switching function)를 정의해야 한다. 이 스위칭 함수는 BBC를 기반으로 정의되기 때문에 2차 이상의 고차 시스템에 적용하기 힘들다. PMSM(permanent magnet synchronous motor), 구동 드라이버, 그리고 관성부하로 구성된 선회구동장치는 비선형 동적 특성을 가지고 있고 이를 물리적인 법칙으로 역학적 모델을 구하기 힘들다. 따라서 Labview의 시스템 식별 툴을 이용하여 실제 선회구동장치를 스위칭 함수를 정의하는데 용이한 표준형 2차 모델로 식별한다. 식별된 모델을 이용하여 최단시간 강인제어기를 설계하고 Matlab을 이용한 시뮬레이션과 실제 시스템에 구현된 실험결과로 그 제어성능을 입증하고자 한다.

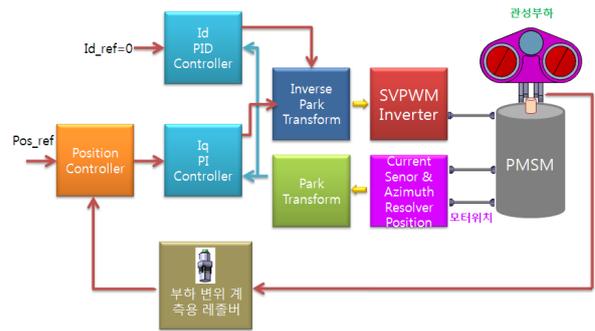
2. 본 론

본 논문에서는 관성부하를 부착한 선회구동장치를 정밀 제어하기 위한 시스템 설계와 최단시간 강인제어 알고리즘 개발을 목적으로 하고 있다. 먼저 관성부하를 부착한 선회구동장치의 최단시간 강인 제어기를 설계하기에 앞서 시스템의 역학적 특성을 나타내는 스위칭 함수를 정의하기 위한 시스템 모델이 필요하다. 본 논문에서는 복잡하게 구성된 선회구동장치의 모델을 구하기 위해 Labview의 시스템 식별 툴을 사용하고, 여러 가지 식별법 중 partially known model estimation method를 사용하여 실제 시스템의 동적 특성과 근사적인 표준형 2차 모델을 정의한다. 구해진 모델을 이용하여 최단시간 제어기의 대표적인 제어기인 BBC 제어기의 스위칭 함수를 정의하고, BBC와 SMC의 장점만을 적용한 혼합제어기인 High-gain PD 제어기와 RNTOC에 스위칭 함수를 적용하고 제어법칙을 정의한다.

2.1 시스템 구성

관성부하와 구동되는 시스템의 변위와 속도를 계측하기 위해 부착된 레졸버를 이용한 선회구동장치는 그림 1과 같이 구성되어 있다. 관성부하를 회전시키기 위한 액츄에이터(actuator)로 PMSM(permanent magnet synchronous motor)를 적용하였고 시스템의 구동 변위 및 속도를 검출하기 위해 레졸버 센서를 부착하였다. 또한 PMSM의 구동을 위한 공간 전압벡터 PWM(SVPWM) 기법을 적용하였으며 PI제어기를 이용하여 i_d 와 i_q 전류를 제어하였다. 그리고 본 논문에서 다루는 최단시간 강인

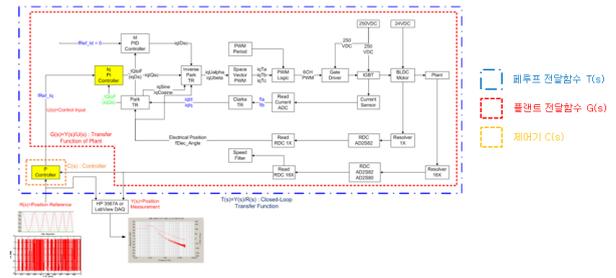
제어기를 위치제어기로 사용하였다.



<그림 1> 선회구동장치의 전체 시스템 구성도

2.2 선회구동장치의 시스템 식별

선회구동장치의 시스템 식별은 최단시간 강인제어기 설계에서 역학적 특성을 나타내는 스위칭 함수를 정의하기 위해서 실제 시스템과 근사적인 모델 파라미터를 얻기 위한 목적에 있다. 일반적인 물리적인 법칙을 적용하기에는 본 시스템이 비선형 특성과 구조적으로 복잡한 특성으로 인하여 근사적인 모델을 구할 수 없을 뿐만 아니라 시스템의 정확한 파라미터를 알 수 없기 때문에 적용하기 힘들다. 따라서 복잡하게 구성된 시스템을 물리적인 방법을 이용한 모델링 보다 실험적으로 적용되는 시스템 식별법을 통해 근사적인 모델을 얻기 것이 좀 더 효과적이고 실제 시스템에 더 근접한 모델을 얻을 수 있다.



<그림 2> 시스템 식별을 위한 전체 시스템 블록도

그림 2는 시스템 식별을 위해서 시스템을 플랜트, 위치 제어기, 그리고 플랜트와 위치 제어기를 포함하는 폐로 시스템으로 구분한 전체 시스템 블록도이다. 시스템 식별 목적은 폐로 시스템의 입력력 자료와 partially known model estimation method를 이용하여 폐로 전달함수를 구하고 선형 P제어기와 플랜트로 구성된 폐로 전달함수에 대한 플랜트 전달함수를 구하는 것이다. 여기서 플랜트로 구성된 블록은 관성부하, PMSM, 인버터, i_d , i_q 제어기이고 위치 제어기는 플랜트의 전달함수를 쉽게 구하기 위해서 P제어기로 구성되어 있다. Labview의 시스템 식별 툴을 이용한 Partially known model estimation method에 대한 폐로 전달함수는 다음과 같다.

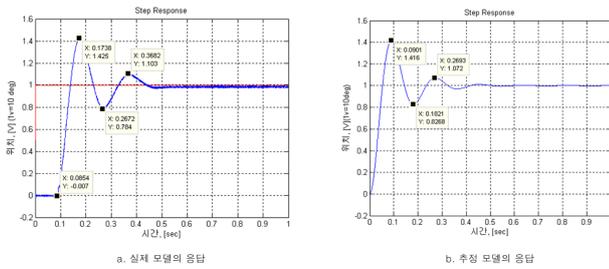
$$T(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = \frac{1288.8}{s^2 + 19.2998s + 1288.8} \quad (1)$$

여기서 $T(s)$ 는 폐로 시스템의 전달함수, $C(s)$ 는 위치 제어를 위한 P제어기이며 P제어기의 비례이득 값은 $k_p = 3$ 으로 설정하였고, $G(s)$ 는 플랜트의 전달함수이다.

폐로 전달함수로부터 플랜트 전달함수 $G(s)$ 는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{T(s)}{C(s)(1-T(s))} = \frac{\beta}{s(s+\alpha)} = \frac{429.6}{s(s+19.2998)} \quad (2)$$

그림 3은 위치제어로 P제어기(비례제어 이득 $k_p = 3$)를 적용한 실제 시스템과 식(2)의 추정 모델에 대한 단위계단 응답을 비교한 것이다. 이 결과로 실제 시스템의 플랜트 모델을 시스템 식별법으로 잘 추정했음을 검증할 수 있다.



〈그림 3〉 실제 시스템과 추정 모델의 단위 계단응답 비교

2.3 최단시간 강인제어기 설계

선회구동장치의 구동제어 목적은 가장 빠른 시간에 오버슈트가 발생하지 않는 조건으로 요구되는 목표치까지 정확하게 도달하는 것이다. 최단시간 제어기는 임의의 초기 상태에서 목표치까지 최소 시간으로 시스템을 구동시키는 제어기이며 일반적인 PID 제어기로는 그 목표를 달성하기 힘들뿐만 아니라 외란 및 시스템 불확실성에 강인하지 못하다. 이런 구동조건을 달성하기 위해서 본 논문에서는 대표적인 최단시간 제어기인 BBC와 외란 및 시스템 불확실성에 강인한 비선형 제어기인 SMC의 장점만을 반영한 혼합 제어기 High-gain PD(proportional derivative) 제어기와 RNTOC를 설계하고자 한다.

2.3.1 Bang-Bang Controller

최단시간 제어기의 대표적인 제어기인 BBC는 제어법칙에 따라 시스템에서 허용할 수 있는 최대값과 최소값으로 제어하는 제어기법이다. BBC에서 제어기 값의 전환을 결정하기 위해 시스템 파라미터에 의해 정의되는 스위칭 함수를 정의해야 한다. 식(2)와 같은 표준형 2차 시스템의 경우 스위칭 함수는 다음과 같다.

$$S(x(t)) = x_1(t) - \frac{x_2(t)}{|x_2(t)|} \frac{\beta U_{max}}{\alpha^2} \ln\left(\frac{\alpha}{\beta U_{max}} |x_2(t)| + 1\right) + \frac{1}{\alpha} x_2(t) \quad (3)$$

여기서 $x_1(t)$ 는 위치 상태, $x_2(t)$ 는 속도 상태, α, β 는 시스템 파라미터, 그리고 U_{max} 는 시스템에서 허용할 수 있는 최대 제어입력 값을 나타낸다. BBC는 최단시간으로 제어할 수 있다는 장점을 가진 반면에 제어기의 채터링(chattering)에 의해 실제 시스템에 구현하기 어려운 단점을 가지고 있다.

2.3.2 Sliding Mode Controller

SMC는 상태에 따라 스위칭 표면(switching surface)에 의해 서로 다른 영역으로 나누어, 어떤 정해진 규칙에 의해 제어법칙을 변화시켜 서로 다른 동적특성을 갖게 제어하는 비선형 제어기법이다. SMC의 가장 큰 특징은 BBC에서 발생하는 액츄에이터의 채터링을 방지하고 외란 및 시스템 불확실성에 강인하다.

2.3.3 High-Gain Proportional Derivative Controller

HGPD는 전형적인 PD 제어기와 구조적인 특성을 갖지만 포화된 제어 신호를 이용한다는 점에서 BBC와 비슷한 최단시간 제어 특성을 나타낼 뿐만 아니라 제어기 구조가 SMC와 같기 때문에 외란과 시스템의 불확실성에 강인한 혼합 제어기이다. HGPD의 제어 알고리즘은 다음과 같다.

$$u = k(\rho x_1(t) + x_2(t)) \quad (4)$$

제어 알고리즘에 따른 스위칭 함수는 다음과 같다.

$$s(t) = \rho x_1(t) + x_2(t) \quad (5)$$

여기서 이득 비 ρ 는 $\rho = \alpha\gamma / (\gamma - \ln(1 + \gamma))$ 이고 γ 는 $\gamma = \sqrt{1 - \exp(-|x_1^0| \alpha^2 / \beta M)}$

이다. 이득 비는 시스템 파라미터와 위치 초기값 x_1^0 으로 결정되는 함수이다. 그리고 M 은 $M = U_{max}$ 최대 제어입력 값이다.

2.3.4 Robust Near Time-Optimal Controller

RNTOC는 BBC와 SMC의 장점을 반영한 혼합제어기이다. RNTOC의 스위칭 함수는 BBC의 스위칭 함수(3)와 같으며 제어 알고리즘은 다음과 같다.

$$u = -U_{max} \text{sat}\left\{\frac{\hat{u}}{U_{max}} \left[\text{sat}\left(\frac{x_2(t)}{\omega_{sat}}\right) + \epsilon \cdot \text{sat}\left(\frac{\tilde{S}}{S_{sat}}\right) \right]\right\} \quad (6)$$

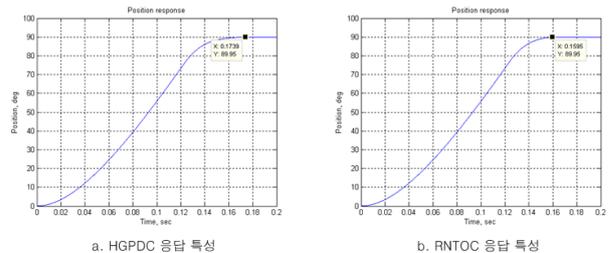
여기서 \hat{u} 은 $\hat{u} \leq U_{max}$ 조건을 만족하게 설정하고 saturation normalization parameters인 ω_{sat}, S_{sat} 은 다음과 같다.

$$\omega_{sat} = \frac{\hat{u}}{b}, \quad S_{sat} = \frac{\epsilon \hat{u}}{k} \quad (7)$$

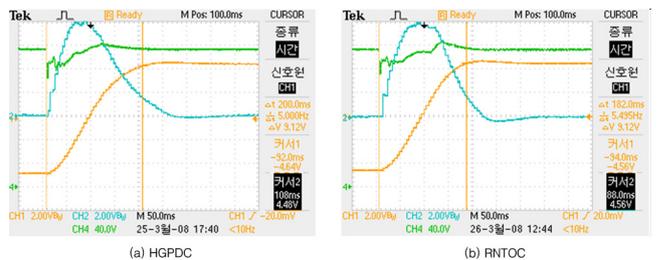
식(7)은 채터링과 외란 및 시스템 불확실성에 강인하게 동작하기 위한 RNTOC 설계 파라미터이다.

2.4 시뮬레이션 및 실험 결과

시뮬레이션 및 실험에서는 제어목표로 90도 구동시 200ms안에 정상 상태에 도달해야 하며 최대한 오버슈트를 발생시키는 않는 것이다. 그림 4와 5는 HGPD와 RNTOC의 제어성능을 비교한 시뮬레이션 및 실험 결과이다. 시뮬레이션에서 정상상태 도달시간은 HGPD 경우 173.9ms, RNTOC 경우 159.6ms이고 실험에서는 HGPD 경우 200ms, RNTOC 경우 182ms이다.



〈그림 4〉 HGPD와 RNTOC의 응답 시뮬레이션



〈그림 5〉 HGPD와 RNTOC의 응답 실험

3. 결론

본 논문에서는 선회구동장치의 시스템 모델을 Labview를 통해 실험적으로 구하였다. 그리고 구해진 플랜트 모델을 이용하여 최단시간 강인 제어기인 HGPD와 RNTOC를 설계하였으며 그 제어 성능을 시뮬레이션 및 실험으로 입증하였다.

〈참고문헌〉

[1] Shang-Tao WU, "Time-Optimal Control of Servo Systems Using PD Algorithms", JSME International Journal, Series C, Vol. 41, No 3, pp 384-390, 1998
 [2] W. S. Newman, "Robust Near Time-Optimal Control", IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 35, No. 7, pp 841-844, July 1990

본 연구는 국방과학연구소 용역과제 지원으로 수행되었음