

서보전동기 구동시스템의 자기동조 비례적분 속도제어기 설계

문경주, 정유석, 손영익  
명지대학교

Design of a self-tuning PI speed controller for servo systems

K. Moon, Y. Jeong, Y. Son  
Myongji University

**Abstract** - This paper presents an algorithm to design a self-tuning proportional-integral(PI) speed controller for servo systems. The control gains are calculated with estimated system parameters, i.e. inertia and viscous damping which are estimated by initial operation. The simulation and experimental results show the feasibility and performance of the proposed algorithm.

1. 서 론

서보전동기 구동시스템은 위치, 속도를 궤환하여 지령을 추종하는 시스템으로 다양한 산업 응용 분야에 사용되고 있다. 서보시스템에 요구되는 주요한 특성 중의 하나는 연결되는 부하의 종류에 관계없이 일정한 추종 특성(tracking characteristic)을 나타내는 것으로 주로 제어기의 자기동조(self-tuning) 또는 자동동조(auto-tuning)의 기법을 통해 구현되었다[1]-[3]. 이러한 기법들은 대개 순환최소제곱법(recursive least square), 극-영점배치(pole-zero placement), 신경회로망(neural network)과 같은 이론들을 적용한다. 본 연구에서는 초기 운전을 실시하여 측정된 속도를 이용하여 부하의 기계정수인 관성과 점성 계수를 추정하고, 추정된 기계정수로부터 비례적분(PI) 속도제어기의 이득을 설정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 모의실험과 실제시험을 통하여 타당성 및 성능을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 서보전동기의 기계 정수 추정[4]

서보전동기의 기계방정식은 탄성을 무시할 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_E = J \frac{d\omega_M}{dt} + B\omega_M + \tau_L \quad (1)$$

여기서  $\omega_M$ 은 전동기의 회전각속도,  $\tau_E$ 와  $\tau_L$ 은 각각 전동기의 전자기 토크와 부하 토크이고  $J$ 와  $B$ 는 각각 관성 계수(inertia coefficient)와 점성 계수(viscous coefficient)이다.

시운전 동안에는 부하 토크가 인가되지 않고 기계적 시정수가 변하지 않는다고 가정하면 다음과 같이 기계적인 정수(parameter)를 추정할 수 있다. 식 (1)에 회전각속도의 미분을 양변에 곱하여 적분하면 다음과 같다.

$$\int \tau_E \frac{d\omega_M}{dt} dt = J \int \left(\frac{d\omega_M}{dt}\right)^2 dt + B \int \omega_M \frac{d\omega_M}{dt} dt \quad (2)$$

식 (1)에 회전각속도를 양변에 곱하여 적분하면 다음과 같다.

$$\int \tau_E \omega_M dt = J \int \omega_M \frac{d\omega_M}{dt} dt + B \int \omega_M^2 dt \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 연립하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} J \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int \left(\frac{d\omega_M}{dt}\right)^2 dt & \int \omega_M \frac{d\omega_M}{dt} dt \\ \int \omega_M \frac{d\omega_M}{dt} dt & \int \omega_M^2 dt \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \int \tau_E \frac{d\omega_M}{dt} dt \\ \int \tau_E \omega_M dt \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{\int \left(\frac{d\omega_M}{dt}\right)^2 \int \omega_M^2 dt - \left\{ \int \omega_M \frac{d\omega_M}{dt} dt \right\}^2} \times \begin{bmatrix} \int \omega_M^2 dt & - \int \omega_M \frac{d\omega_M}{dt} dt \\ - \int \omega_M \frac{d\omega_M}{dt} dt & \int \left(\frac{d\omega_M}{dt}\right)^2 dt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int \tau_E \frac{d\omega_M}{dt} dt \\ \int \tau_E \omega_M dt \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 속도의 시작과 끝이 동일하면  $\int \omega_M \frac{d\omega_M}{dt} dt = 0$  이 되므로 다음과 같이 간략화 된다.

$$\hat{J} \approx \frac{\int \tau_E \frac{d\omega_M}{dt} dt}{\int \left(\frac{d\omega_M}{dt}\right)^2 dt}, \hat{B} \approx \frac{\int \tau_E \omega_M dt}{\int \omega_M^2 dt} \quad (5)$$

식 (5)에서 속도의 미분값을 디지털 제어기로 구현할 때 분할차분(divided difference)보다 고역통과필터(HPF)를 사용하는 것이 훨씬 실용적이다. 차단주파수가  $K_h$ 인 고역통과필터를 이용해 추정된 속도의 미분값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\hat{\omega}_M}{dt} = K_h(\omega_M - \hat{\omega}_M) \quad (6)$$

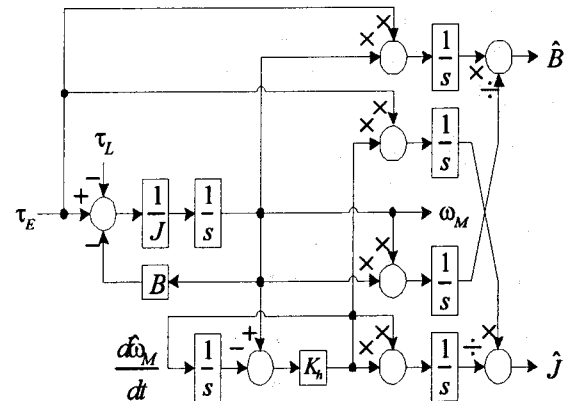


그림 1. 기계 정수 추정법

식 (6)을 이용해 기계 정수를 추정하는 알고리즘을 그림 1와 같이 나타낼 수 있다.

### 2.2 서보전동기의 속도 제어

서보전동기의 속도 제어는 일반적으로 산업계에서 비례-적분 제어기(PI controller)를 사용하는데 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_E^* = \left( K_P + \frac{K_i}{s} \right) (\omega_M^* - \omega_M) \quad (7)$$

여기서  $K_P$ 와  $K_i$ 는 각각 속도제어기의 비례이득과 적분 이득이다.

식 (1)과 (7)을 이용하여 구한 속도 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\omega_M}{\omega_M^*} = \frac{K_P s + K_i}{J s^2 + (B + K_P) s + K_i} \quad (8)$$

제어응답 특성이 차단주파수  $\omega_n$ 인 1차 저역통과필터(LPF)의 형태를 나타내기 위해 제어이득을 다음과 같이 선정할 수 있다.

$$K_P = \omega_n \hat{J}, \quad K_i = \omega_n \hat{B} \quad (9)$$

추정된 기계정수 값이 실제와 같을 경우 식 (8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\omega_M}{\omega_M^*} = \frac{\omega_n}{s + \omega_n} \quad (10)$$

### 2.3 모의 실험

서보전동기의 모델을 그림2과 같이 Simulink 로 나타내었다. 향후 부하토크 입력을 모사하기 위하여 SimDriveline의 Torque Actuator를 이용하여 전동기 측에 부하를 연결할 수 있는 형태로 모델링하였다.

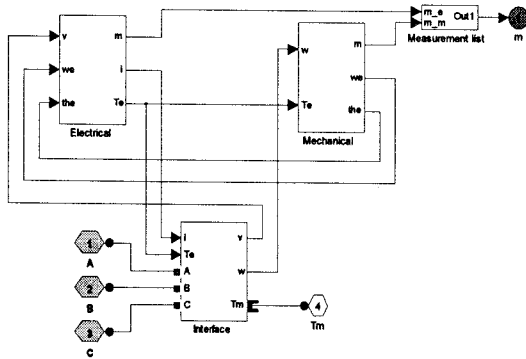


그림 2. 서보전동기 Simulink model

서보전동기를 구동하는 전력변환기 모델을 그림 3에 나타내었다. 모의실험의 수행속도를 높이기 위해 전동기를 구동하는 전력소자의 출력은 실제 PWM 전압이 아니라 스위칭 주기 평균 전압을 인가하는 형태로 구현하였다.

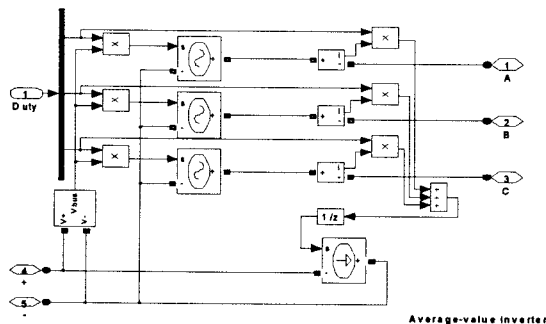


그림 3. 전력변환기 Simulink model

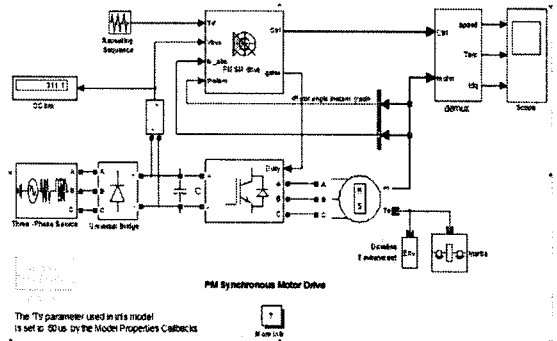


그림 4. 서보전동기 구동시스템 simulink model

서보전동기 구동시스템 전체 모델을 그림 4에 나타내었다. 디지털 제어기의 최소 샘플링 주기가 100 $\mu$ s로 설정되어 있고, 모의실험 step size는 1/4인 25 $\mu$ s로 설정되어 있다.

시운전을 위한 토크 지령은 정격토크의 15%까지 4초 동안 삼각파의 형태로 인가하는 도중 영속에 도달하면 종료하는 방식을 사용하였다. 모의실험은 부하의 관성이 전동기의 관성의 3배인 경우에 대하여 수행하였다. 모의 실험결과 파형은위로부터 차례로 전동기 속도, 전동기 토크, 추정 관성계수, 추정 점성계수를 나타내었다. 부하의 관성이 전동기의 관성의 3배인 경우에 대하여 모의 실험 한 결과를 그림 5에 나타내었다.

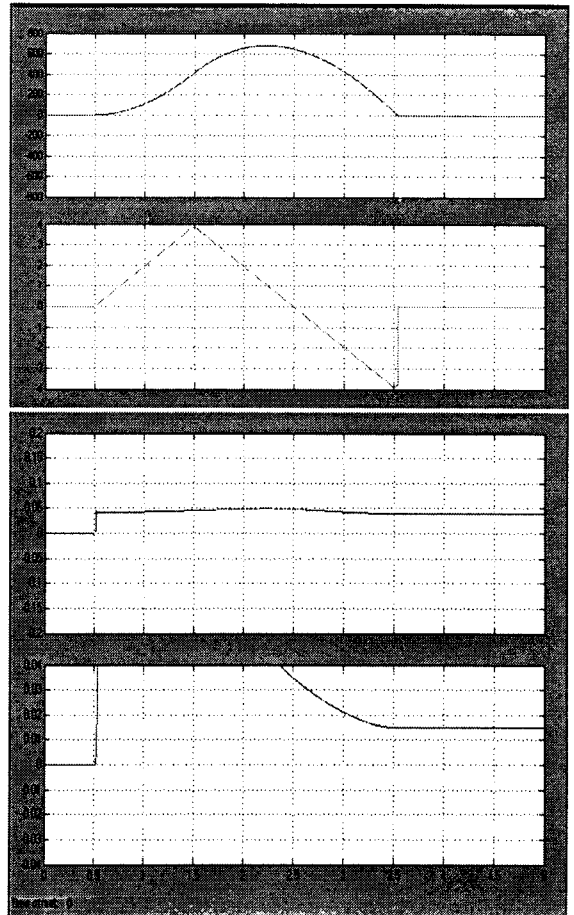


그림 5. 부하관성이 3배인 경우의 모의실험 결과

## 2.4 실험 결과

그림 7에 나타난 각각의 관성체에 대하여 본 연구에서 제안한 방식으로 추정한 계수들을 이용하여 정정시간이 0.3초가 되도록 자동으로 속도제어기의 조정이득을 조정 한 후 300(r/min)의 계단응답을 관찰한 결과 관성체의 종류에 관계없이 일정한 응답 특성을 얻을 수 있었다.



그림 7. 관성체 장착 모습

소형 관성체를 장착한 경우 관성계수와 점성계수는 각각 약 0.03kgm<sup>2</sup>과 0.01kgm/s로 추정되었다. 시운전 결과와 조정된 제어 이득을 적용하여 300(r/min)의 계단 입력 응답을 실험한 결과를 그림 8에 나타내었다.

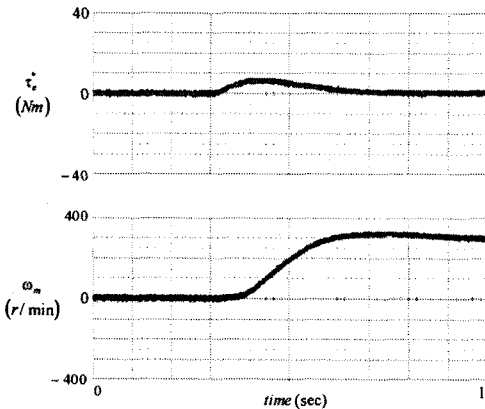


그림 8. 소형 관성체의 실험 결과

중형 관성체를 장착한 경우 관성계수와 점성계수는 각각 약 0.10kgm<sup>2</sup>과 0.02kgm/s로 추정되었다. 시운전 결과와 조정된 제어 이득을 적용하여 300(r/min)의 계단 입력 응답을 실험한 결과를 그림 10에 나타내었다.

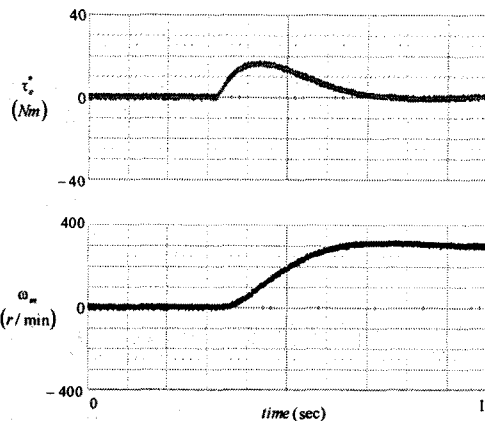


그림 9. 중형 관성체의 실험 결과

대형 관성체를 장착한 경우 관성계수와 점성계수는 각각 약 0.17kgm<sup>2</sup>과 0.02kgm/s로 추정되었다. 시운전 결과와 조정된 제어 이득을 적용하여 300(r/min)의 계단 입력 응답을 실험한 결과를 그림 10에 나타내었다.

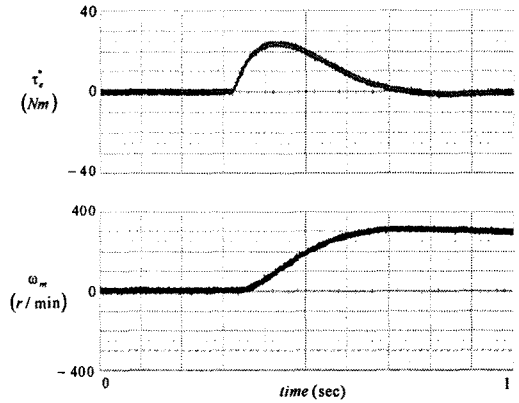


그림 10. 대형 관성체의 실험 결과

## 3. 결 론

본 연구에서는 시운전을 통해 서보전동기의 기계 정수인 관성 계수와 점성 계수를 추정하고 추정된 계수를 이용한 속도 제어이득 자동조정 알고리즘을 제안하였다. 55W급 서보전동기를 구동한 결과 3가지의 다른 관성체에 대하여 동일한 정정 시간의 응답 특성을 관찰할 수 있었다. 본 연구 결과를 이용하여 기존의 서보전동기 구동시스템에 구현되어 있는 속도제어함수에 약간의 S/W만 추가함으로써 약 4초의 시운전후 속도 제어이득이 자동으로 조정되는 기능을 추가할 수 있다. 향후 연구에서는 탄성부하의 사용을 고려해 축진동 억제 알고리즘을 개발하여 서보전동기 구동시스템의 성능을 향상하는 것이 필요하다고 판단된다.

## [감사의 글]

본 연구는 산업자원부의 전력산업 고급인력양성사업의 지원으로 명지대학교 분산 전원복합운용연구센터를 통해 수행되었음.

## [참 고 문 헌]

- [1] 차용석, 지준근, "DC 전동기 구동시스템을 위한 자기동조 속도제어기의 설계", 전력전자학술대회논문집 전력전자학회 1999년 추계학술대회논문집, pp. 25 ~ 28, 1999
- [2] 윤기갑, 양해원, "극배치 PID 자기동조 제어방식에 의한 DC 서보 전동기의 속도제어", 대한전자공학회 학술발표회 논문집, pp. 84 ~ 87, 1988
- [3] 구영모, 이윤섭, 김대중, 임은빈, 우광방, "신경회로망을 이용한 선형직류 전동기의 자기동조적용제어", 대한전자공학회 학술회의 (자동제어 학술회의 논문집) 제1권, pp. 399 ~ 401, 1989
- [4] Tae-Suk Kwon, Seung-Ki Sul, Hiroshi Nakamura, and Kazuhiro Tsuruta, "Identification of the Mechanical Parameters for Servo Drive", Industry Applications Conference, Volume 2, pp. 905 ~ 910, 2006