

# 자기 동조 제어를 이용한 압연용 직류 전동기 구동 시스템의 속도 제어기 설계

지준근, 송승호, 설승기, 박민호  
서울대학교 전기공학과

## Design of Speed Controller of Rolling Mill DC Motor Drive System Using Self-Tuning Regulator

Jun-keun Ji, Seung-ho Song, Seung-ki Sul, Min-ho Park  
Seoul Nat'l University Electrical Eng. Dept.

### Abstract

In this paper a self-tuning control algorithm has been utilized to control speed of a rolling mill DC drive system. Inner current control loop is composed of predictive current controller and the outer speed control loop is composed of the self-tuning PI or IP controller. Computer simulation results reveal that the adaptive control algorithm using self-tuning control is capable of following the typical set point variations required for a rolling mill in conjunction with load torque variations on the shaft of the drive.

### 1. 서론

부하 변동이 심한 압연용 전동기 구동 시스템에서는 정교한 속도 제어 및 빈번한 속도의 반전이 요구된다. 고정밀 속도 제어에 사용되고 있는 종래의 PI 제어기는 양호한 정상 상태 특성을 가지고 있으나 급격한 부하 토크의 변동이나 시스템의 파라미터가 변동시에는 만족스런 성능을 주지 못한다. 따라서 산업체에서 요구되는 사항들을 만족시키기 위해서는 적응 제어(Adaptive Control) 이론의 적용이 요구된다.

자기 동조 제어기(Self-tuning regulator)는 산업체에서의 요구 사항들을 만족시킬 수 있는 실현 가능하고 전망있는 이상적인 제어기이다. 자기 동조 제어기에서는 제어 대상 시스템 모델(model)의 파라미터들이 측정된 시스템의 입출력 데이터로부터 실시간(on-line) 계산으로 추정되어지고, 그 정보를 가지고 미리 정해진 제어 방식을 사용하여 최적의 제어가 행해진다.

본 연구에서는 고속의 DSP 320C30 시스템을 사용하여 예측 전류 제어를 포함한 기존의 모든 제어 알고리즘(Algorithm)을 구현하고, 종래의 PI 속도 제어기의 이득(Gain)을 사용자가 조정(tuning)하는 번거로움을 제거하면서 파라미터의 변동이 있는 상황에서도 제어기가 스스로 파라미터를 추정하여 제어기의 이득(Gain)을 조정(tuning)하는 자기 동조 제어기(self-tuning regulator)를 적용하는 것을 검토하고자 한다.

컴퓨터 시뮬레이션 결과는 만족스러운 결과를 보여 주고 있어서, 압연용 전동기 구동 시스템 같은 경우에도 자기 동조 제어기를 사용하는 적응 제어 이론이 적용되어질 수 있다는 가능성을 충분히 나타내 준다.

### II. 자기 동조 제어기(Self-Tuning Regulator) [1]

자기 동조 제어(self-tuning control)는 다음의 과정을 포함한다.

- 1) 적절한 모델 구조(model structure)를 결정하는 것.
- 2) 적절한 추정 알고리즘(identification algorithm)을 사용하여 모델(model)의 파라미터들을 recursive하게 추정하는 것.
- 3) 추정된 파라미터들을 사용하여 적절한 제어기의 설계 방법에 따라서 제어 신호를 결정하는 것.

이렇게 얻어진 제어기는 그 자신의 제어 파라미터(control parameter)들을 조정(tuning)하는 기능을 가지고 있으므로 자기 동조 제어기(self-tuning regulator:STR)라고 한다. 그림 1은 자기 동조 제어기(self-tuning regulator)의 구성도이다. 자기 동조 제어기(self-tuning regulator)는 2개의 루프(loop)로 구성되는데, 내부 루프(loop)는 프로세스(process)와 보통의 선형 궤환 제어기로 이루어지고 외부 루프(loop)는 제어기의 파라미터들을 recursive하게 추정하는 파라미터 추정부와 제어기 설계 계산부로 이루어진다.

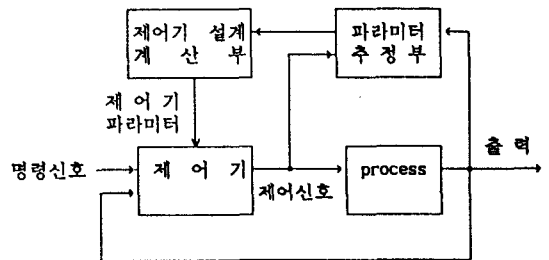


그림 1 자기 동조 제어기(self-tuning regulator)의 구성도

자기 동조 제어기(self-tuning regulator)는 제어기의 설계 방법에 따라 그 종류가 매우 다양하다. phase and amplitude margins, pole-placement, minimum variance control, LQG-control 등의 제어기 설계 방법에 기초한 자기 동조기(self-tuner)들이 고려되어 왔다. 또한 파라미터 추정(parameter-estimation) 방법에도 여러가지가 있다. 예를 들면, stochastic approximation, least squares, extended and generalized least squares, instrumental variables, extended Kalman filtering, maximum-likelihood 등이 있다.

표. 자기 동조(Self-Tuning) 속도 제어기[3 ~ 6]

본 논문에서는 종래의 임연용 전동기 구동 시스템에서의 PI 속도 제어부를 RLS estimation을 사용하는 자기 동조(self-tuning) 속도 제어로 구성하였다. 그리하여 원하는 특성을 갖도록 하는 최적의 제어기의 이득(gain)을 제어기가 실시간(on-line) 계산으로 자동 조정(auto-tuning)하면서 파라미터 변동에 대해서 강인하게 동작하는 속도 제어기 특성을 시뮬레이션을 통해서 살펴보았다.

1) 속도 제어 루프 모델링(Speed Control Loop Modeling)

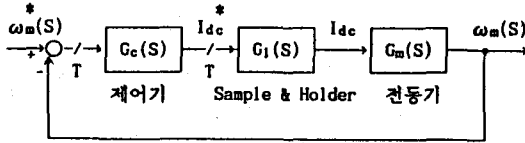


그림 2 속도 제어 루프 구성도

$$G_c(S) = K_p + K_i/S \quad : \text{PI 제어기} \quad (1)$$

$$G_1(S) = (1 - e^{-TS})/S \quad : \text{Sample \& Holder} \quad (2)$$

$$G_m(S) = \frac{\omega_m(S)}{I_{dc}(S)} = \frac{K_t}{JS + B} = \frac{K_t/B}{1 + T_m S} \quad (3)$$

여기서 J : 전동기와 부하의 전체 관성 모멘트  
 B : 마찰 계수(viscous friction)  
 K<sub>t</sub>: 전동기 토크 상수  
 T<sub>m</sub>: 기계적 시정수(=J/B)

$$G_1(S)G_m(S) = \frac{(1 - e^{-TS})}{S} \frac{K_t/B}{1 + T_m S} \quad (4)$$

$$\Rightarrow G_1(Z)G_m(Z) = (1 - Z^{-1})Z \left[ \frac{(1 - e^{-T/S})}{S} \frac{K_t/B}{1 + T_m S} \right]$$

$$= \frac{K_t(1 - e^{-T/T_m})/B}{Z - e^{-T/T_m}} = \frac{b_1}{Z - a_1} \quad (5)$$

$$G_m(Z) = \frac{\omega_m(Z)}{I_{dc}(Z)} = \frac{b_1}{Z - a_1} = \frac{b_1 Z^{-1}}{1 + a_1 Z^{-1}} \quad (6)$$

$$\text{여기서 } a_1 = e^{-T/T_m}, \quad b_1 = K_t(1 - a_1)/B \quad (7)$$

2) RLS Estimation

파라미터 a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>을 추정하기 위해서 recursive 방정식을 식(11)로부터 구하면,

$$\omega_m(k) = a_1 \omega_m(k-1) + b_1 I_{dc}(k-1) \quad (8)$$

그러므로 RLS 식들은 다음과 같다.

$$\theta(k) = \theta(k-1) + K(k-1)[y(k) - \varphi^T(k)\theta(k-1)] \quad (9)$$

$$K(k-1) = P(k-1)\varphi(k)[\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)]^{-1} \quad (10)$$

$$P(k) = [I - K(k-1)\varphi^T(k)]P(k-1)/\lambda \quad (11)$$

여기서  $\theta(k) = [a_1 \quad b_1]^T$  : 전동기 파라미터 벡터  
 $y(k) = \omega_m(k)$  : 전동기 속도 출력  
 $\varphi(k) = [\omega_m(k-1) \quad I_{dc}(k-1)]^T$  : 측정된 입출력 벡터  
 행렬 K(k-1)의 성분들은 weighting factor들로서 보정항(correction term)과 과거의 추정치를 결합시켜준다. Covariance 행렬 P의 초기치는 매우 큰 값을 갖는 α에 의해 αI로서 정해진다. λ는 forgetting factor로서 전형적인 값의 범위는 0.95 ≤ λ ≤ 0.99이다. Estimator의 수렴 여부는 단지 측정된 입출력 벡터에만 의존하고 파라미터 벡터 θ에는 무관하다. 그러므로 파라미터 벡터 θ의 초기치는 중요하지 않으므로 θ(0)는 영으로 정해진다.

3) 전동기 파라미터 : J 와 B

일단 파라미터 a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>이 추정되면 전동기와 부하의 전체 관성 모멘트(J)와 마찰계수(B)는 (12)식으로부터 구해진다.

$$B = \frac{K_t(1 - a_1)}{b_1} \quad (12)$$

$$J = \frac{-BT}{\ln a_1} \quad (13)$$

여기서 T는 estimator 또는 속도 제어 루프의 sampling time이다(대략 5.55ms).

4) PI/IP 속도 제어기 & Pole Placement 설계

속도 제어 loop은 PI 또는 IP 제어기가 사용된다. 먼저 PI 제어기를 사용하는 구성도가 그림 3에서 보여진다. 이때 제어기의 전달함수는 식 (19)와 같다.

$$G_c(Z) = K_p + K_i T/(Z-1) \quad (14)$$

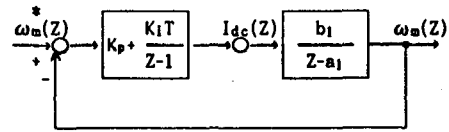


그림 3 속도 제어 루프 구성도(PI 제어기)

전동기의 전기적 시정수는 기계적 시정수에 비해서 매우 작으므로 무시하고, 전체 속도 제어 루프의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$G(Z) = \frac{\omega_m(Z)}{\omega_m^*(Z)} = \frac{b_1 K_p Z + b_1 (K_i T - K_p)}{Z^2 - (1 + a_1 - b_1 K_p)Z + [a_1 + b_1 (K_i T - K_p)]} \quad (15)$$

$$= \frac{N(Z)}{D(Z)} = \frac{N(Z)}{(Z - p_1)(Z - p_2)} = \frac{N(Z)}{Z^2 - (p_1 + p_2)Z + p_1 p_2}$$

$$p_1 + p_2 = 2e^{-\zeta \omega_n T} \cos \omega_n T \sqrt{1 - \zeta^2} = (1 + a_1 - b_1 K_p) \quad (16)$$

$$p_1 p_2 = e^{-2\zeta \omega_n T} = a_1 + b_1 (K_i T - K_p) \quad (17)$$

여기서 ζ는 damping ratio이고, ω<sub>n</sub>은 undamped natural frequency이다.

따라서 제어기의 이득(Gain)들이 다음 식들에 의해서 구해진다.

$$K_p = [1 + a_1 - 2e^{-\zeta \omega_n T} \cos \omega_n T \sqrt{1 - \zeta^2}] / b_1 \quad (18)$$

$$K_i = (e^{-2\zeta \omega_n T} + b_1 K_p - a_1) / b_1 T \quad (19)$$

다음에는 IP 제어기를 사용하는 구성도가 그림 4에서 보여진다.

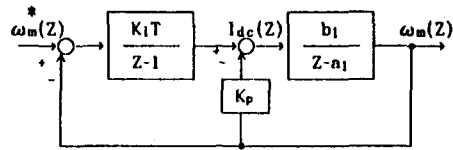


그림 4 속도 제어 루프 구성도(IP 제어기)

전체 속도 제어 루프의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$G(Z) = \frac{\omega_m(Z)}{\omega_m^*(Z)} = \frac{b_1 K_i T}{Z^2 - (1 + a_1 - b_1 K_p)Z + [a_1 + b_1 (K_i T - K_p)]} \quad (20)$$

IP 제어기는 특성 방정식이 PI 제어기의 경우와 동일하므로 위에서 구한 것과 동일한 방법에 의해서 제어기의 이득(Gain)들을 구할 수 있다.

## V. 시뮬레이션 및 검토

앞절에서 설명한 RLS estimation을 사용한 자기 동조 (self-tuning) PI/IP 속도 제어기의 응답 특성을 기준 속도 step 응답특성 및 정격 부하 토오크 인가시의 응답 특성, 기준 속도 정역 반전시의 step 응답특성 등으로 살펴보고, RLS estimation에서의 파라미터 추정 특성을 행렬 P의 초기치와 forgetting factor  $\lambda$ 의 값을 변화시키면서 살펴보았다.

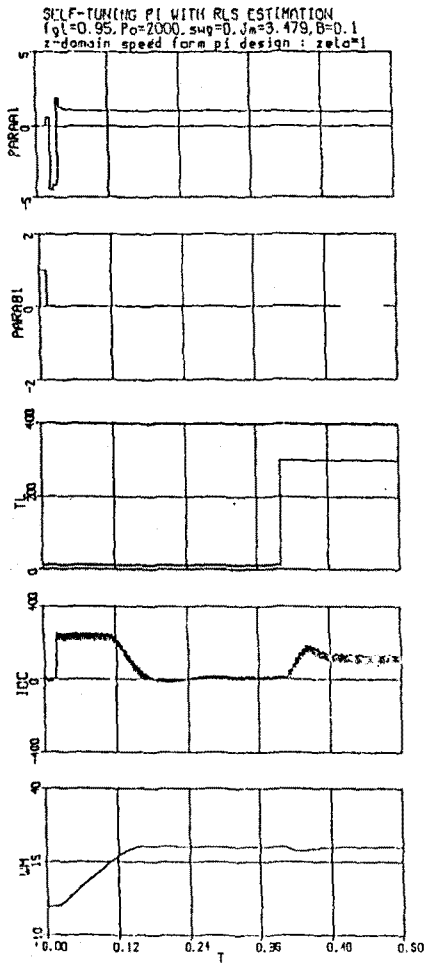


그림 5 자기 동조 (self-tuning) PI 속도 제어  
 ( $P_0 = 2000, \lambda = 0.95, T_I = 320[N \cdot m]$ )

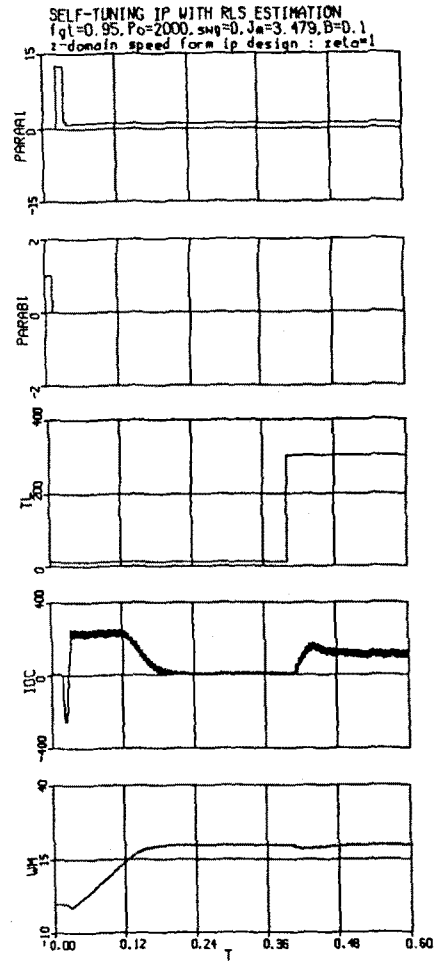


그림 6 자기 동조 (self-tuning) IP 속도 제어  
 ( $P_0 = 2000, \lambda = 0.95, T_I = 320[N \cdot m]$ )

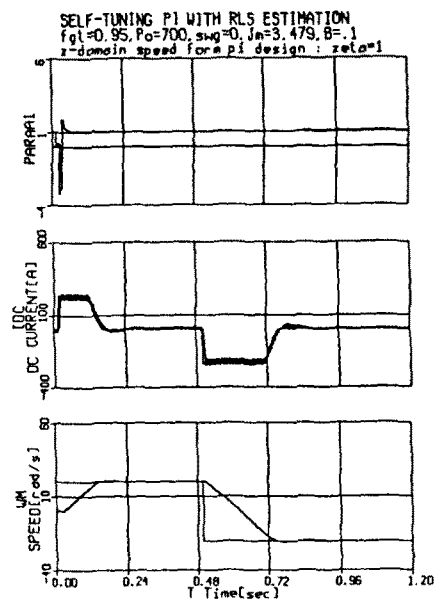


그림 7 자기 동조 (self-tuning) PI 속도 제어  
 ( $P_0 = 700, \lambda = 0.95, \text{기준속도 } 20 \rightarrow -20[\text{rad/s}]$ )

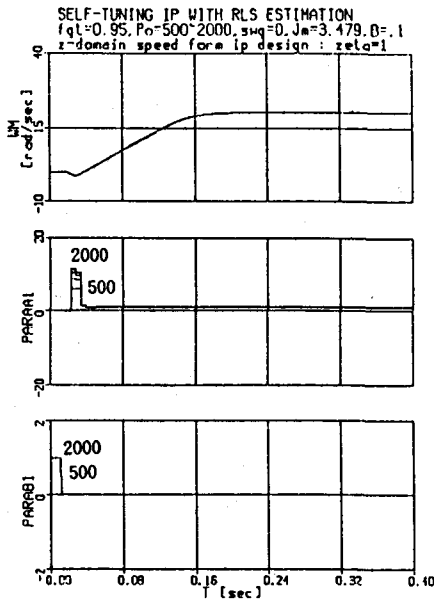


그림 8 자기 동조( self-tuning ) IP 속도 제어  
 (  $P_0 = 500 \sim 2000, \lambda = 0.95, \text{ 기준속도 } 20[\text{rad/s}]$  )

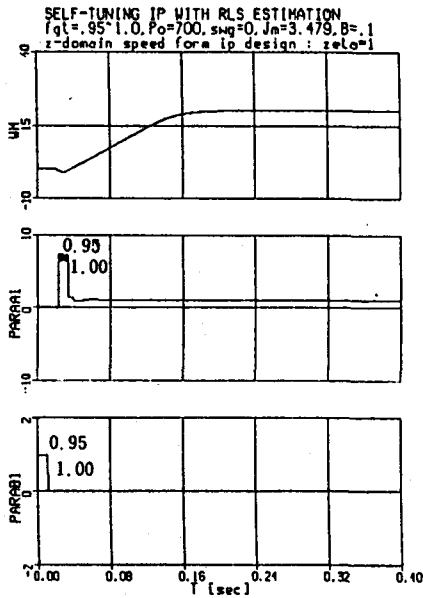


그림 9 자기 동조( self-tuning ) IP 속도 제어  
 (  $P_0 = 700, \lambda = 0.95 \sim 1.0, \text{ 기준속도 } 20[\text{rad/s}]$  )

## V. 결론

압연용 직류 전동기 구동 시스템의 속도 제어에 자기 동조(self-tuning) 제어 이론을 적용하여 사용자에게 의한 제어기의 이득 조정(gain tuning)의 부담을 줄이고 보다 우수한 응답특성을 갖는 속도 제어기를 구성할 수 있음을 보였다. 차후의 연구 과제로서 압연용 전동기 구동 시스템의 비틀림 진동(torsional vibration) 문제를 고려한 자기 동조 제어기(self-tuning regulator)의 설계에 관한 연구가 필요하다.

## VI. 참고 문헌

- [1] Karl J. Aström and B. Wittenmark, "Computer Controlled Systems", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1984.
- [2] Karl J. Aström & Tore Hägglund, "Automatic Tuning of PID Controllers", Instrument Society of America, 1988.
- [3] Louis A. Dessiant, Bernard J. Hebert, Hoang Le-Huy & Gianni Cavuoti, "A DSP-Based Adaptive Controller for a smooth positioning System", IEEE Trans., on Ind. Elec., Vol. IE-37, No. 5, Oct., 1990.
- [4] Ramachandran Balasubramanian and Kong Hung Wong, "A Microcomputer-Based Self-Tuning IP Controller for DC Machines", IEEE Trans., on Ind. App., Vol. IA-22, No. 6, Nov/Dec, 1986, pp 989-999.
- [5] R.E. Brown, G.N. Maliotics & J.A. Gibby, "PID Self-Tuning Controller for Aluminum Rolling Mill", IEEE-IAS, Annual Meeting Conf. Rec., 1990, pp 1374-1380.
- [6] S.Kumar Bharadwaj & Amrish Chandra, "Application of a Self Tuning Algorithm to a Rolling Mill Drive", IEEE IAS, Annual Meeting Conf. Rec., 1990, pp 428-434.