

壓延驅動制御系の 安定度 判定法에 관한 연구

정호성\* 백기남\* 강명조\*\*  
\* 산업과학기술연구소 \*\* 포항제철

A study on the stability criterion of the control systems for the drive systems in rolling mill plants

H.S. JEONG\* K.N. BAEK\*  
\* RIST Control Lab.

M.J. KANG\*\*  
\*\* POSCO

ABSTRACT

It is necessary for us to maintain good the quality of products in iron and steel making process, especially in the rolling mill plants. Thus, we need check the stability criteria of control systems.

In the frequency domain, the whole system including controllers can be identified using FFT analyzer. But this method is not adequate where precise identification is demanded. Thus a way to complement the defects in the frequency domain analysis using FFT analyzer is introduced.

And in the time domain, to establish the stability criteria on the control systems, the assumed parameters obtained using least square method are presented in this report.

1. 서론

제철소의 모든 공정에서 제품의 品質은 전기적인 측면에서 볼 때, 驅動制御系の 制御精度에 左右된다고 볼 수 있다. 특히 제철 공정에서 마무리 단계인 壓延工程에서는 더욱 더 중요하다고 볼 수 있다. 고로 高精度 制御系를 구성하기 위해서는 制御對象 시스템의 精確한 識別 작업이 先行되어야 한다. 이와 관련하여 大石瀧<sup>1)</sup> 등은 他勵直流通電機의 토오크 제어를 위하여 觀測器를 사용하였고, 齊藤 利海<sup>2),4)</sup> 등은 압연기의 速度 制御를 위한 Parameter Identifier를 제안한 바 있다.

그러나 실제 제철소에서의 壓延驅動 시스템은 앞서 언급한 識別 方法에서의 諸條 條件과는 相異한 點이 아니라, 데이터 蒐集 方法을 비롯한 기타 劣惡한 條件으로 既存의 方法이 適用되는 때에는 많은 難點이 있다.<sup>3)</sup>

이러한 계 상항을 고려하여 본 연구에서는 最小自乘法에 이론적 바탕을 두고, 제철소의 對象 制御器 모델에 操業時의 實際 入力信號를 인가했을 때 出力의 再現性에 따라 制御系の 安定度를 判斷할 수 있는 方法을 提示하고자 한다.

2. 壓延 驅動制御系の 構成 및 既存의 安定度 判定法

대체로 압연 공정에 사용되는 Motor는 他勵直流通電方式인데, 압연 Motor가 Base Speed에 도달할 때까지는 Armature control 방식을 사용하고, 그 이상 최고 속도까지는 Field control을 하고 있다. 실제 구동 Motor 제어기는 매우 복잡하지만, 블록으로 간략화하면 그림 1과 같은 구성이 된다. 여기서 점선부분은 FFT analyzer를 사용하여 실험할 경우의 구성을 나타낸 것이다.

현재 제철소에서 가장 널리 사용되는 식별 방법은 각종 Recorder를 사용하여 신호를 수집하고, 事故가 發生하였을 경우에 수집된 신호의 波形을 보고 異狀有無의 判斷 및 異狀 個所를 判斷하는 것이었다. 이 방법은 관련 분야에 많은 經驗을 가진 技術者가 必要할 뿐 아니라, 完全故障狀態가 아닌 臨界의 인 狀態에 대한 判斷은 主觀的 이 될 可能性이 높다는 難點이 있다. 이에 대한 改善策으로 日本 鐵鋼業界에서는 FFT analyzer를 이용한 周波

數 應答法을 도입하고 있다.<sup>5)</sup> 同一한 方法을 補項製鐵에 適用해 본 결과<sup>3)</sup>, 操業중인 시스템에 영향을 주지 않는 適正 시험신호 크기를 찾기가 힘들 뿐 아니라, 계 반 Noise가 시험에 미치는 영향의 평가가 곤란하다는 단점이 크게 노출되었다.

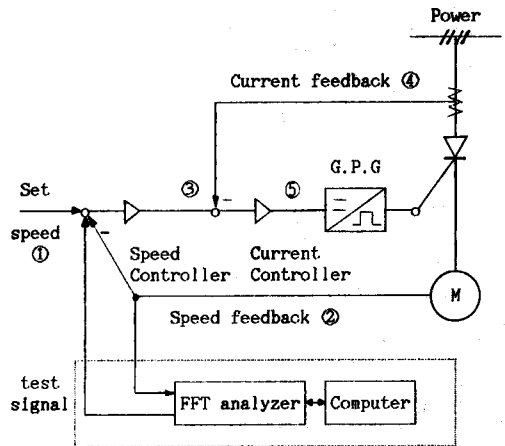


그림 1. 압연 구동제어계 구성 블록도

3. 壓延驅動制御系の 安定度 判定

시스템 識別이란, 測定한 入-出力값에 근거를 두고 動的인 시스템의 數學的 모델을 찾아내는 것이다.<sup>6)</sup> 따라서 본 연구에서 대상으로 하는 壓延驅動制御系가 安定한지를 判定하기 위해서는 識別 작업이 先行되어야 한다. 본 연구에서 사용한 시험의 순서는 그림 2와 같다.<sup>6)</sup>

본 연구에서는 어떤 대상 제어기의 기준입력은 Ref로, feedback되는 신호는 Fbk로, 출력은 y로, 오차는 e로 표시한다. 실제 수집한 현장 데이터는 discrete 신호이므로 n번째 데이터는 변수의 우하변에 첨자 n을 병기하기도 한다. 우선 P controller에 대해 생각해보기로 한다. 比例利得을 K라 두고, 첫번째 데이터로부터 n번째 데이터까지의 출력에서의 오차의 제곱식을 評價函數로 두면, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$J = \sum_{n=1}^n \{ y_n - K(Ref_n - Fbk_n) \}^2 \quad (1)$$

따라서 誤差가 最小이 되는 K를 구하면, 식 (2)와 같다.

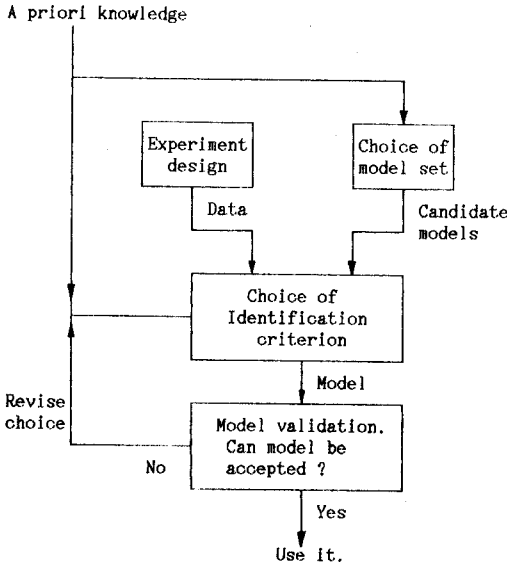


그림 2. 식별의 순서

$$K = \frac{\sum_{n=1}^n y_n \text{Ref}_n - \sum_{n=1}^n y_n \text{Fbk}_n}{\sum_{n=1}^n (\text{Ref}_n - \text{Fbk}_n)^2} = \frac{\sum_{n=1}^n y_n \text{Ref}_n - \sum_{n=1}^n y_n \text{Fbk}_n}{\sum_{n=1}^n e_n^2} \quad (2)$$

PI controller에 대해서도 동일한 방법으로 전개하면, 우선 PI controller의 수식은 식(3)과 같으므로, 이산화한 출력식은 식(4)와 같이 된다.

$$\frac{y}{e} = \frac{K(1 + Ts)}{Ts} \quad (3)$$

$$y_{n+1} = y_n(K/T \cdot \Delta t + K)e_{n+1} - Ke_n \quad (4)$$

여기서  $K/T \cdot \Delta t + K = K_I$ 로 두면,  $K_I$ 와  $K$ 는 식(5)와 같이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} K_I \\ K \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} \sum U_n^2 & \sum U_n U_{n+1} \\ -\sum U_{n+1} U_n & -\sum U_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum (Y_{n+1} - Y_n) U_n \\ \sum (Y_{n+1} - Y_n) U_{n+1} \end{bmatrix}}{(\sum U_n U_{n+1})^2 - \sum U_n^2 \cdot \sum U_{n+1}^2} \quad (5)$$

PID controller에 대한 출력식은 식(6)과 같이 되므로, 동일한 알고리즘을 사용하면, 식(7)과 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서  $K(1 + \Delta t/T_i + T_d/\Delta t) = A$ ,  $K(2T_d/\Delta t + 1) = B$ ,  $KT_d/\Delta t = C$ 로 두었다.

$$Y_n = Y_{n-1} - K(1 + \Delta t/T_i + T_d/\Delta t)e_n + K(2T_d/\Delta t + 1)e_{n-1} - (KT_d/\Delta t)e_{n-2} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sum (Y_{n-1} - Y_n) e_n \\ \sum (Y_{n-1} - Y_n) e_{n-1} \\ \sum (Y_{n-1} - Y_n) e_{n-2} \end{bmatrix} / \det \quad (7)$$

여기서 행렬  $X$ 와  $\det$ 는 다음과 같다.

$$X = \begin{bmatrix} \sum e_{n-1}^2 \cdot \sum e_{n-2}^2 - (\sum e_{n-1} \cdot \sum e_{n-2}) \cdot (\sum e_n \cdot e_{n-1}) & (\sum e_n \cdot e_{n-1}) \cdot (\sum e_{n-1} \cdot e_{n-2}) \\ e_{n-1}^2 & -(\sum e_{n-1}) \cdot \sum e_{n-2}^2 \\ (\sum e_n \cdot e_{n-1}) \cdot (\sum e_{n-1} \cdot e_{n-2}) & \sum e_n^2 \cdot \sum e_{n-2}^2 - (\sum e_n \cdot e_{n-1})^2 \\ -(\sum e_n \cdot e_{n-1}) \cdot \sum e_{n-2}^2 & (\sum e_n \cdot e_{n-1}) \cdot (\sum e_n \cdot e_{n-2}) \\ (\sum e_n \cdot e_{n-1}) \cdot (\sum e_{n-1} \cdot e_{n-2}) & (\sum e_n \cdot e_{n-1}) \cdot (\sum e_n \cdot e_{n-2}) \\ -\sum e_{n-1}^2 \cdot (\sum e_n \cdot e_{n-2}) & -\sum e_n^2 \cdot (\sum e_{n-1} \cdot e_{n-2}) \end{bmatrix}$$

$$\det = \sum e_n^2 \cdot \sum e_{n-1}^2 - \sum e_{n-2}^2 - \sum e_n^2 \cdot \sum e_{n-1} \cdot e_{n-2} + \sum e_{n-2} \cdot e_n - \sum e_n \cdot e_{n-1} \cdot \sum e_n \cdot e_{n-1} \\ \sum e_{n-2}^2 + \sum e_n \cdot e_{n-2} \cdot \sum e_n \cdot e_{n-1} \cdot \sum e_{n-1} \cdot e_{n-2} + \sum e_n \cdot e_{n-1} \cdot \sum e_n \cdot e_{n-2} \cdot \sum e_{n-1} \\ e_{n-2} - (\sum e_n \cdot e_{n-2})^2 \cdot \sum e_{n-1}^2$$

tachometer를 포함한 모터의 전달函數는 통상 식(8)과 같이 표현된다. 이것에 대해서도 앞의 알고리즘을 이용하면, 식(9)와 같은 출력식을 얻을 수 있다. 따라서 식(10)과 같은 값을 얻을 수 있다.

$$G(s) = M / (s^2 + ks + N) \quad (8)$$

$$Y_{n+2} = Y_{n+1} (2 + K \cdot \Delta t) / [1 + K \cdot \Delta t + N(\Delta t)^2] - Y_n / [1 + K \cdot \Delta t + N(\Delta t)^2] + e_{n+2} M(\Delta t)^2 / [1 + K \cdot \Delta t + N(\Delta t)^2] \quad (9)$$

여기서,  $(2 + K \cdot \Delta t) / [1 + K \cdot \Delta t + N(\Delta t)^2 + N(\Delta t)^2] = A$ ,  $1 / [1 + K \cdot \Delta t + N(\Delta t)^2] = B$ ,  $M(\Delta t)^2 / [1 + K \cdot \Delta t + N(\Delta t)^2] = C$ 라 두고, 오차를 최소가 되게 할 때의 각 계수의 값을 구하면, 식(10)과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sum Y_{n+2} Y_{n+1} \\ \sum Y_{n+2} Y_n \\ \sum Y_{n+2} Y_{n+2} \end{bmatrix} / \det \quad (10)$$

$$\det = \sum Y_{n+1}^2 (\sum Y_n \cdot (\sum Y_n^2 \sum e_{n+2}^2 - \sum e_{n+2} Y_n \sum Y_n \cdot e_{n+2}) + \sum Y_n \cdot Y_{n+1}) \\ (\sum Y_{n+1} Y_n \sum e_{n+2}^2 - \sum e_{n+2} Y_n \sum Y_{n+1} e_{n+2}) + \sum e_{n+2} Y_{n+1} \\ (\sum Y_{n+1} Y_n \sum Y_n \cdot e_{n+2} - \sum Y_n^2 \sum Y_{n+1} \cdot e_{n+2})$$

$$Y = \begin{bmatrix} \sum Y_n^2 \sum e_{n-2}^2 - (\sum e_{n+2} Y_n)^2 & \sum e_{n+2} Y_{n-1} \sum Y_n \cdot e_{n+2} & \sum Y_n Y_{n+1} \sum e_{n-2} \cdot e_n \\ -\sum e_{n+2} Y_n \sum Y_n \cdot e_{n+2} & -\sum Y_n Y_{n+1} \sum e_n^2 & -\sum e_{n-2} Y_{n+1} \sum Y_n^2 \\ \sum e_{n+2} Y_n \sum Y_{n-1} \cdot e_{n+2} & \sum Y_n \cdot \sum e_{n-2}^2 - \sum e_{n+2} Y_{n+1} \sum Y_n \cdot Y_n \\ -\sum Y_{n-1} Y_n \sum e_{n-2}^2 & (\sum e_{n+2} Y_n)^2 & -\sum Y_n^2 \sum e_{n-2} \cdot Y_n \\ & e_{n-2} & \\ \sum Y_{n+1} Y_n \sum Y_n \cdot e_{n+2} & \sum Y_n Y_{n+1} \sum Y_{n+1} \cdot e_{n+2} & \sum Y_{n+2}^2 \sum Y_n^2 - (\sum Y_n Y_{n+1})^2 \\ -\sum Y_n^2 \sum Y_{n+1} \cdot e_{n+2} & -\sum Y_n \cdot \sum Y_n \cdot e_{n+2} & -\sum Y_n \cdot Y_{n+1} \sum Y_{n+1} \cdot Y_n \end{bmatrix}$$

#### 4. 실험 및 Simulation

본 연구에서는 HP3054 Data Acquisition System을 사용하였으며, 데이터의 검증을 위해 IBM-PC AT 호환 기종과 Analog Design사의 A/D converter를 사용하였다. 실험 대상은 浦項製鐵 1熱延 工場 마무리 압연(Finishing Mill) 공정으로 roll이 6개로 구성되어 있다. 데이터 수집점은 그림 1에서의 ①, ②, ③, ④, ⑤로 표시된 곳이다.

이 수집점들에 대해 수집한 데이터를 보여주는 것이 그림 3이며, ①, ②, ③ 점에 대해 앞서 제시한 알고리즘을 적용해 보았다. 이 라인에서는 P controller를 사용하고 있다. 그림 4를 보면 3번 궤에 걸려진 약간 완만한 궤이 simulation에 의한 결과이다. 실제 적용시에는 그림 4에서 나타나는 바와 같이 無負荷, metal-in, 全負荷時의 3 section을 나누어 最適 parameter를 구하면 된다. 이 parameter는 실제의 parameter값과는 다르지만, 동일한 실험조건만 유지하면 일정한 범위의 값을 나타내므로, 실험시 복잡한 준비가 생략될 수 있으며 각 플랜트별로 안정한 영역의 parameter값을 구해놓으면, 主觀的 判斷에 依한 誤差를 最小化할 수 있다. Metal-in부분에서의 해석시에 오차 e는 ramp input이 아니지만, reference가 ramp이므로 식(11)과 같은 出力式을 얻을 수 있다.

$$y_n = 2y_{n-1} - y_{n-2} + K_{pp}(\Delta t)^2 e_n \quad (11)$$

여기서  $K_{pp}$ 는 step input인가시의 비례이득에 ramp 함수의 기울기를 곱한 값이다. 그러면  $K_{pp}$ 는 식(12)와 같이 되며, 識別 結果가 良好함을 알 수 있다.

$$K_{pp} = \frac{\sum y_n e_n - 2 \sum y_{n-1} e_n + \sum y_{n-2} e_n}{(\Delta t)^2 \sum e_n^2} \quad (12)$$

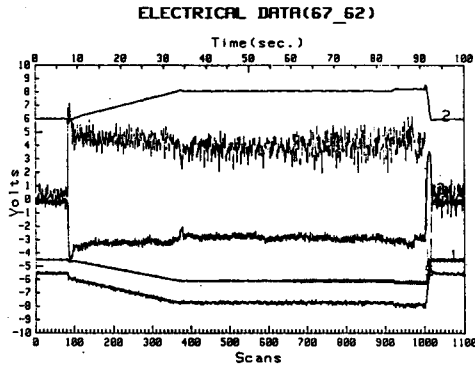


그림 3. 포함제철 1열연 마무리 압연에서의 제어 신호

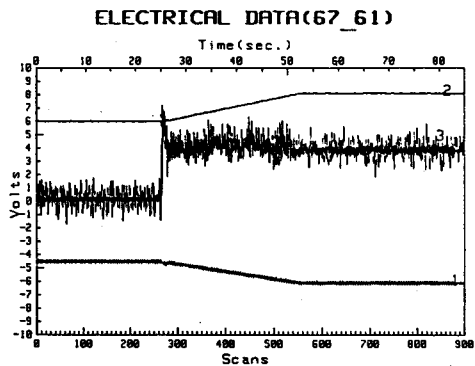


그림 4. 속도제어기 출력 Simulation 결과

참고문헌

1. 大石 潔, "二慣性共振を持つ他勵直流機の一速度制御法", 日本電氣學會論文誌B, Vol.104, No.6, pp.373-37, 1984
2. 齊藤 制海, "壓延機のL.Q.I. 速度制御系とパラメータ同定器-", 日本電氣學會論文誌B, Vol.105, No.3, pp.373-337, 1985
3. 정호성, 강명조, 大韓電氣學會創立40周年記念大學術大會論文集, pp.147-149, 1987
4. 齊藤 制海, "L.Q.I. 技法による壓延速度制御系の外亂抑制", 日本電氣學會論文誌B, Vol.103, No.9, pp.634, 1985
5. H.Rake, "Step response and frequency response methods", AUTOMATICA, Vol.16, pp.519-526, 1980
6. SYSTEMS & CONTROL ENCYCLOPEDIA, Vol.4, Pergamon Press, 1987

5. 結論

製鐵所 壓延工程에서의 既存의 方法을 補完할 目的으로 現場에서 수집한 출력 데이터와 대상 제어기의 假定 모델의 出力의 差가 最小가 되는 假想적인 parameter값을 구함으로써 壓延驅動制御系の 安定度 判定의 基準으로 使用할 수 있었다.