

열간압연 연속공정용 전동기 구동시스템의 속도 및 장력제어

송승호*
*기초전력공학공동연구소

설승기**
**서울대학교

Speed and Tension Control of Motor Drive System in Hot Strip Finishing Mill

Seung-Ho Song*

Seung-Ki Sul**

*Electrical Engineering and Scientific Research Institute

**Seoul National University

Abstract - 철강 생산 라인 중에서도 핵심적인 열간 압연 라인의 연속 사상압연 공정을 소개하고 스탠드간에 위치한 루퍼의 각도 제어와 장력제어의 상호 관계를 설명하였다. 또한 압연용 전동기 속도 제어계 특성의 설계법을 보였다. 이와 같은 연속 압연 공정에서는 철판이 여러 압연기에 동시에 물려있는 상태로 운전되므로 인접한 압연기들의 속도 제어 응답성이 동일한 특성을 갖는 것이 필요하다.

어하는 응답성 또한 매우 중요하다. 특히 인접한 압연 주기 모터의 속도제어 응답성 차이는 중간 소재의 장력 변동을 유발할 수 있다.

본 논문에서는 열간 압연 라인의 사상 압연기와 루퍼 압으로 구성된 속도 및 장력 제어 시스템을 대상으로 기존의 루퍼 각도 및 장력 제어계를 소개하고, 압연용 주기 모터의 속도 제어계 설계법과 속도제어계의 응답성이 시스템의 장력 변동에 미치는 영향을 검토한다. 이와 같은 사상압연기의 속도제어와 스탠드간 루퍼 장력 제어는 생산제품의 품질을 좌우하는 매우 중요한 요소이다.

1. 서 론

산업용 전동기 구동시스템의 응용분야 중에서 가장 대용량이면서 높은 정밀도를 필요로 하는 것중의 하나가 철강 압연용 주기(主機) 구동 시스템이라고 할 수 있다. 열간 압연 라인은 슬라브(Slab)를 가열한 후 압연하여 열연 코일을 생산하는 공정으로서 보통 조압연(Roughing Mill) 부분과 사상압연(Finishing Mill) 부분으로 나뉘어 진다.

사상 압연부에서는 여러 대의 롤러 스탠드가 연속적으로 위치하여 상위 제어기의 지령에 따라 압연량을 조절한다. 생산 제품에 따라 정밀한 치수 제어를 위해 철판의 두께를 순차적으로 얇게 되도록 압연한다. 이때 각 압연기 스탠드 사이에는 루퍼 암(looper arm)을 설치하여 소재가 일정한 각도를 유지하면서 평평한 상태로 통과하도록 함으로서 압연시 안정성을 높이고, 철판의 장력을 일정하게 유지하는 역할을 감당한다.

각 스탠드의 주기 모터 구동시스템은 압연용 물리의 회전 속도를 정확히 제어함으로써 생산되는 철판 소재의 통과량(Mass Flow)을 맞추면서 소재의 장력을 제어하는 역할을 담당한다. 압연 주기의 운전모드는 속도 제어모드로서 상위에서 계산된 속도 지령에 따라 압연 롤러가 정확한 속도로 구동되도록 속도제어기를 설계한다. 이 때 필요한 속도 지령을 정확하게 결정하는 것도 중요하지만 계산된 속도 지령에 따라 충실히 제

2. 열간 압연 라인의 구성

2.1 사상압연기와 루퍼

사상압연기 스탠드와 스탠드 사이에 설치된 루퍼는 크게 다음과 같은 두 가지 역할을 담당한다. 첫째는 스탠드간 장력을 일정하게 제어함으로써 스트립의 두께와 폭 변화를 방지한다. 두 번째로는 루퍼각도를 일정하게 조절하여 스탠드간 과도한 루퍼가 발생하는 것을 막고 안정한 운전을 할 수 있도록 한다. 이것은 마치 댄서롤이 장력 측정용 센서로 쓰이는 동시에 장력을 일정하게 유지하는 제어기로 동작하는 것과 같은 원리이다.

루퍼 시스템에 영향을 미칠 수 있는 외란은 다음과 같은 것들이 있다. 슬라브 온도의 저하로 인한 소재의 경화, 고탄소강 소재의 진입, 압연속도의 고속화 등이 그것이다. 열연 강판의 두께를 엄밀하게 제어하기 위해 다수의 스탠드(통상 6~7개)를 연속적으로 배치하여 압연재를 연속적으로 압연하는 것을 사상압연(Finishing Mill)이라고 한다. 그림 1에 사상압연 부분의 구성도를 나타내었다. 각 압연기 스탠드는 Back-up Roll과 Work Roll의 다단 구조로 되어 있으며 APC(Automatic Position Control) 형태의 압하기구를 갖추고 있어 압하력 조절에 의한 압연 두께 조절이 가능하다. 각 주기 모터는 속도

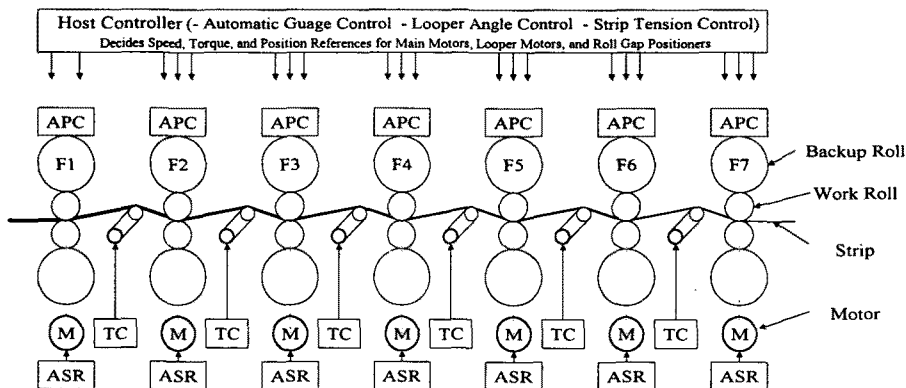


그림 1. 연속 사상 압연 라인 구성도

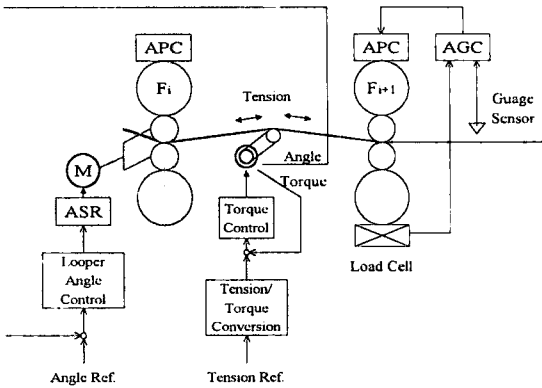


그림 2. 루퍼 각도 및 장력 제어기 구성에

제어(ASR: Automatic Speed Regulator) 모드로 구동되며 스탠드간에 설치된 루퍼 양은 토오크 제어(TC: Torque Control) 모드로 구동되고 있다. 상위 제어기(Host Controller)는 각 스탠드의 속도와 압하량, 그리고 루퍼 구동 토오크를 실시간으로 결정하게 된다.

그림2에는 한 스펀(span)을 대상으로 루퍼 각도 및 장력 제어기 구성 예를 보이고 있다. 판 두께 제어기 AGC(Automatic Guage Controller)는 로드셀(Load Cell) 및 출측 두께 센서로부터 피드백값을 받아 압연 롤러의 압하량을 결정한다. 루퍼 제어기에서는 루퍼 구동롤의 토오크를 기준 장력에 따라 일정하게 제어하면서 루퍼 양의 각도를 일정하게 유지하도록 앞단 롤러의 속도 기준값을 적절히 조절한다. 압연재의 장력(Tension)과 루퍼(Looper)양은 압연기 롤의 주속도(周速度) 및 스탠드 간 루퍼 구동롤의 토오크를 조절하여 제어하게 된다.

2. 루퍼 각도 및 장력 제어기 모델링

2.1 장력 발생 모델

스탠드간 장력의 변동은 압연기 속도차와 루퍼의 각도 변동에 의한 성분을 고려하여 (1) 식과 같이 주어진다.

$$\frac{d}{dt} \Delta \sigma_i = -\frac{1}{T_{\sigma}} \Delta \sigma_i + \frac{K_{\sigma}}{T_{\sigma}} \{ X_1 \Delta \theta_i - (1 + \epsilon_i^*) \Delta v_i \} \quad (1)$$

여기서 σ_i 는 스탠드간의 장력, θ_i 는 루퍼의 각도, v_i 는 i 번째 롤의 선속도를 나타내며 T_{σ} 는 장력 발생계의 시정수, K_{σ} 는 속도 변화에 대한 장력 발생 계수를 나타내며 X_1 은 루퍼 각도와 재료 길이의 환산 계수이다. ϵ 는 압연기 통과 소재의 두께차이를 고려한 선진율(先進率)로서 i 번째 스탠드의 속도와 $i+1$ 번째 롤의 속도 차이 비율을 뜻한다. 즉 철판의 두께가 얇아지는 후단 스탠드일수록 선속도를 높여 Mass Flow를 일정하게 유지한다. 각 변수들 앞에 Δ 가 붙은 것은 정상상태값으로부터의 편차를 의미하며 장력발생에 앞단 속도차 Δv_i 만을 고려한 것은 후단 스탠드의 속도 Δv_{i+1} 를 기준으로 하여 앞단 속도가 얼마나 차이 나는가에 따라 장력이 결정된다는 뜻이다. 실제로 사상 압연기중 마지막 스탠드(그림 1에서는 F7)를 피벗(Pivot) 스탠드라 하여 선속도 v_{lwns} 으로 일정하게 유지하고, 앞단 스탠드들의 속도를 순차적으로 변경시켜나가는 방식을 취하고 있다.

그림 3에 선형화된 장력 및 루퍼각도 제어기의 블록선도를 보인다.

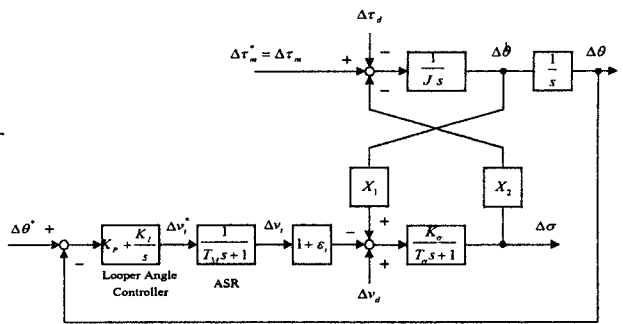


그림 3. 루퍼 각도 및 장력 제어기 블록 선도

2.2 루퍼의 운동방정식

장력에 의한 부하 토오크와 구동모터 토오크의 차이로 인해 가속이 발생하므로 루퍼각도가 일정하게 유지되기 위해서는 이 두 힘이 평형을 이루어야 한다.

$$J_i \frac{d}{dt} \Delta \dot{\theta}_i = \Delta \tau_i - X_2 \Delta \sigma_i \quad (2)$$

2.3 압연 주기 모터의 속도 제어기

플랜트를 1차 시스템(관성)으로 가정하고, 적절한 비례 적분 제어기를 설계한 경우 속도 기준값으로부터 실제 속도까지의 페루프 속도 제어기를 1차 시스템으로 근사화하는 것이 가능하다.

$$\frac{d}{dt} \Delta v_i = -\frac{1}{T_M} \Delta v_i + \frac{1}{T_M} \Delta v_i^* \quad (3)$$

2.4 루퍼 각도 제어기

기준 각도와 실제 각도의 차이를 없애도록 비례 적분 제어기를 이용하여 앞단 롤러의 속도기준값 조정량을 결정한다.

$$\Delta v_i^* = K_P (\theta_i^* - \theta_i) + K_I \int (\theta_i^* - \theta_i) dt \quad (4)$$

이러한 루퍼 각도 제어기와 장력제어기는 상호 간섭이 존재하는 시스템이다. 즉 루퍼 각도 제어를 위해 앞단 롤러의 속도를 조절하면 철판의 장력이 변동하여 루퍼 구동 모터의 토오크가 변동하게 되고, 반대로 루퍼 모터의 구동 토오크를 일정하게 제어하면 루퍼 각도 변화를 일으키게 되는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 여러 가지 다변수 비간섭 제어도 연구되고 있다.[1]

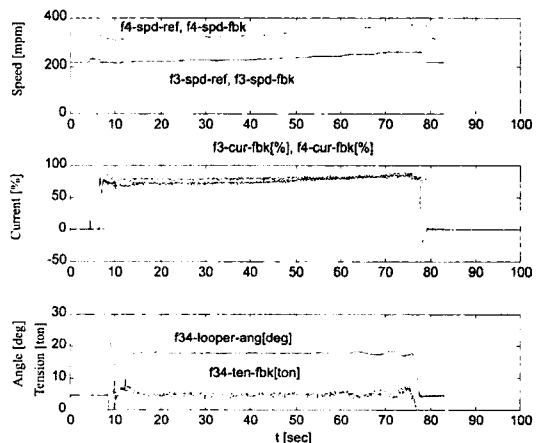


그림 4. 압연중 루퍼 각도 제어 및 속도 제어 특성

그림 4에 실제 압연중 루퍼 각도 제어의 한 예를 보인다. 압연중 F3와 F4 사이에 위치한 루퍼의 각도를 약 18도로 제어하고 있음을 알 수 있다. 초기 압연 부분과 뒷부분 고속 영역에서 루퍼각과 장력이 변동하는 구간이 발생하고 있다. 이것은 강판 소재가 처음 진입된 직후 과도상태에서 발생하는 것으로 이 구간을 최소화 하는 것이 필요하다. 함께 보인 F3과 F4 스탠드의 속도와 전류를 통해 정상적인 압연이 되고 있는 것을 알 수 있다.

3. 압연용 전동기의 속도 제어계 설계

3.1 속도 제어기 설계

일반적인 압연용 전동기 구동시스템의 속도 제어기는 그림 5에 보인 것과 같이 비례 적분 제어기를 근간으로 하고 있다. 직렬접속된 전류 제어계의 응답특성이 속도 제어계에 비해 충분히 빠르고, 기계계의 마찰을 무시하면 속도 제어계의 개루프 전달함수는 (5)식과 같이 주어진다.

$$G_{sc}^o(s) = \left(K_{ps} + \frac{K_{is}}{s} \right) \frac{K_T}{J_m s} \quad (5)$$

이것의 주파수 특성을 직선으로 근사화한 것이 그림 6에 표시한 보드 선도이다. 그림 6에는 개루프 전달함수에 포함된 각 성분들도 함께 점선으로 표시되어 있다. 여기서 ω_{sc} 는 속도 제어계의 교차각 주파수에 해당하며 속도제어계의 응답 특성을 나타낸다. 비례 적분 속도 제어기의 절점 주파수 ω_{pi} 는 식 (6)과 같다.

$$\omega_{pi} = \frac{K_{is}}{K_{ps}} \quad (6)$$

$|G_{sc}^o(j\omega_{sc})| = 1$ 이 되도록 비례이득 K_{ps} 값을 (7) 식과 같이 설정하고 적분이득은 PI 절점주파수가 개루프 전달함수의 교차각 주파수보다 충분히 낮은 위치에 있도록 (8)식과 같이 설계한다.

$$K_{ps} = \frac{J_m \omega_{sc}}{K_T} \quad (7)$$

$$K_{is} = \frac{K_{ps} \omega_{sc}}{5} \quad (8)$$

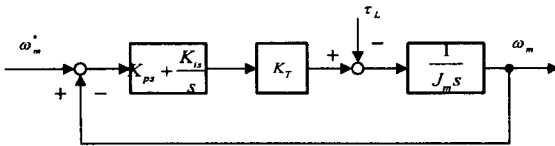


그림 5. 속도 제어기 구성

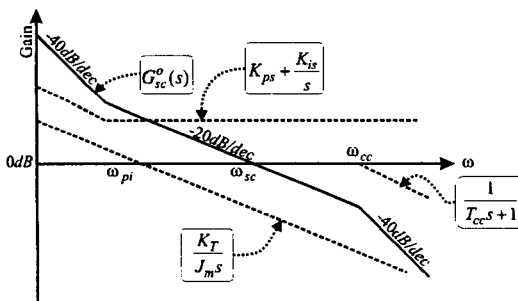


그림 6. 속도 제어기 설계를 위한 보드 선도

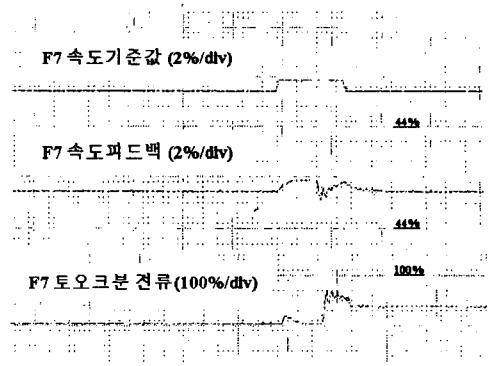


그림 7. 사상 압연용 전동기 속도 제어 특성 (time:0.5sec/div)

3.2 압연용 전동기 속도 제어 응답 특성

그림 7에는 실제 압연중 철판 소재가 진입하는 순간에 사상압연기 7번 스탠드의 속도 제어 응답 특성을 보인다. 속도 기준값이 스텝형태로 약 0.4% 증가했다가 소재가 진입된 후에 다시 회복되는 것을 알 수 있다. 앞부분에서는 전동기 단독으로 속도 기준값 변화에 대한 스텝 응답특성을 관찰할 수 있다. 중간에 전동기 토오크가 급증한 부분은 실제 철판이 진입하는 순간으로서 매우 큰 임팩트 부하가 걸리는 상황의 스텝 부하 특성이라고 볼 수 있다. 압연용 속도제어기에 있어서는 속도 지령의 변화에 대한 응답 특성 뿐만 아니라 급격한 부하변동에 대한 응답 특성이 매우 중요하며 특히 연속된 압연 공정에서는 철판이 여러 압연기에 동시에 물려있는 상태로 운전되므로 인접한 압연기들의 응답특성이 동일한 특성을 갖는 것이 바람직하다. 또한 전동기와 압연롤 사이를 연결하는 축의 길이가 상당히 긴 경우에는 기계계의 공진 주파수가 낮아져서 제어계 설계에 영향을 미치게 된다.

4. 결 론

열간 압연 라인의 연속 사상압연 공정을 소개하고 스탠드간에 위치한 루퍼의 각도 제어와 장력제어의 상호 관계를 설명하였다. 또한 압연용 전동기 속도 제어 특성의 설계법을 보였다. 이 때 인접한 압연 전동기들의 속도제어 특성 편차는 상위 제어계의 외란 요소로 작용할 수 있으므로 연속된 공정의 압연용 전동기들은 속도 제어 특성을 모두 동일하게 설정하는 것이 필요하다. 실제 압연 공정은 매우 복잡한 시스템이지만 단순화한 모델링에서 출발하여 좀더 실질적인 모델을 개발하고 실제 확인하는 절차가 필요하다고 생각된다. 이러한 작업가운데 액츄에이터 역할을 담당하는 전동기 제어시스템의 정확한 모델링과 적절한 보상기법을 통해 생산 제품의 품질 개선에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

(참 고 문 헌)

- [1] 木村和喜 외 3인, "외란 옵서버를 이용한 열연 사상 압연기의 루퍼 다변수 제어", 일본전기학회논문지 C 116권 10호 pp.1111-1118, 1996.
- [2] Timothy Hesketh 외 4인, "Controller Design fo Strip Finishing Mills", IEEE Trans. on Control Sy Technology, Vol.6, No.2, pp.208-219, 1998.
- [3] Y. Seki 외 5인, "Optimal Multivariable Looper C for Hot Strip Mill", IEEE Trans. on Industry Applic Vol.27, No.1, pp124-130, 1991.
- [4] 이용중 외 2인 역, "산업용 서보모터의 제어시스템 설계" pp.157-161, 대영사, 2000.
- [5] 송승호, "연속 구동 시스템의 속도 및 장력 제어 특성 개선", 박사학위 논문, 서울대학교, 1999.