Feedback linearization을 이용한 연속공정시스템에서 장력의 통특성 개선

정경철,김장목,전석호, 설승기
서울대학교 전기공학부 전력전자 연구실

Improvement of tension dynamic characteristics in continuous process using Feedback linearization method

Jeong Kyung-Cheol, Kim Jang-Mok, Jeon Seok-Ho and Sul Seung-Ki
Power Electronics Lab, School of Electrical Engineering, Seoul Nat'l Univ.

Abstract - 일반적으로 제철공정에서 각 공정사이의 철판의 속도와 장력은 브라이드롤을 이용하여 제어하는데 여기서 입력 측의 브라이드롤은 장력을 제어하고 출력 측의 브라이드롤은 공정의 속도를 제어한다. 이와 같은 방법은 시스템 기동의 순간을 포함하여 공정속도의 변경이 있을 경우 제철 공정 상에서는 특히 철판의 높은 탄성에 기인하여 시스템이 상당히 불안정하게 된다.
본 논문에서는 각 전동기가 정해진 역할에 따라 독립적으로 장력 혹은 공정속도를 제어하고 장력의 모델링에서 비선형의 요소를 되먹임하여 원래의 시스템을 선형화시켰고 이때 미분관측기를 이용하였다. 이 제어기의 장점은 무엇보다도 독립적인 역할의 분담으로 인해 다수의 전동기로 확장이 용이하도록 하는 것이다.

주요어 : 장력제어, 속도제어, feedback linearization

1. 서 론

제철 공정에서 철판은 각종 처리과정을 연속적으로 거치면서 긴 라인(line)을 통과한다. 철판이 롤(roll)을 통하여 진행할 때 장력제어가 잘 이루어지지 않으면 철판이 한쪽으로 치우치는 현상인 사행(strip walking)이 발생하게 되는데 이러한 사행을 감소시키는 것이 제품의 품질을 균일하게 유지하고 철판의 이송 및 생산성 효율의 증가에 매우 중요하다. 일반적으로 이러한 사행을 감소시키기 위해 철판에 장력을 되도록 높게 그리고 일정하게 부과해야 한다. 따라서 외란이 비교적 많은 연속공정 시스템에서 장력이 요구되는 수준과 정확도를 유지하도록 제어하는 것은 매우 중요하다. 장력제어에 관한 연구는 먼저 상태공간상에서 시스템을 모델링하여 제어기를 설계한 바가 있으나 이는 시스템상에 전동기가 다수 포함된 경우 많은 상태변수가 포함되어 비록 그 응답을 향상시킬 수 있으나 시스템의 제어기가 복잡하게 될 수 있다[1]. 그리고 두 롤간에 라인의 속도와 장력간의 간섭성을 없앤 알고리즘을 제안한 연구가 있었으나 이는 관성이 일정하고 반지름이 변화하지 않는 시스템에 대해서만 성립할 수 있고 또한 두개이상의 전동기가 시스템에 포함된 경우에만 그 알고리즘을 적용하기가 곤란하다[2].
그리고 각 샘플링 구간에서 속도를 동작점으로 하여 선형화하는 방법은 각 샘플링 구간마다 시스템의 특성이 달라지는 단점이 있다[3].
본 논문에서는 각 전동기가 정해진 역할에 따라 독립적으로 장력 혹은 공정속도를 제어하고 장력의 모델링에서 비선형의 요소를 되먹임하여 원래의 시스템을 선형화시켰고 이때 미분관측기를 이용하였다. 이 제어기의 장점은 간단하고 독립적인 역할의 분담으로 인해 다수의 전동기로 확장이 용이하도록 하는 것이다.

2. 본 론

2.1 시스템의 수학적 모델[4]

2.1.1 기본가정

(1) 롤러와 철판사이의 마찰을 무시
(2) 철판의 변형도가 매우 작고 고르게 분포한다.
(3) 철판의 밀도는 일정하다.
(4) 철판이 흘러가는 방향으로 더 많은 힘을 받는다.

2.1.2 장력의 모델링

위의 가정에 따라 그림 1에 있는 시스템을 이용하여 장력과 속도의 관계를 구하였다. 점선내부의 제어용적에 질량 보존의 법칙을 적용하면

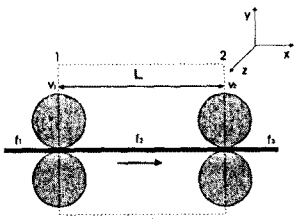

그림 1. 2개의 전동기 시스템.

$$\frac{df_2}{dt} = -\frac{v_2}{L} f_2 + \frac{v_1}{L} f_1 + \frac{AE}{L}(v_2 - v_1) \quad (1)$$

2.1.3 장력과 롤러의 속도 모델링

그림 2에서 보이는 시스템이 실제 제어 알고리즘을 적용할 시스템이다. 그 시스템에 대하여 장력과 롤러의 속도간에 관계를 구하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$J_0 \frac{dw_0}{dt} = T_0 + f_1 \times r_0 \quad (3)$$

$$v_0 = r_0 \times w_0 \quad (4)$$

$$J_1\frac{dw_1}{dt} = T_1 + r_1 \times f_2 - r_1 \times f_1 \quad (5)$$

$$v_1 = r_1 \times w_1 \quad (6)$$

$$J_2\frac{dw_2}{dt} = T_2 + r_2 \times f_3 - r_2 \times f_2 \quad (7)$$

$$v_2 = r_2 \times w_2 \quad (8)$$

$$J_3\frac{dw_3}{dt} = T_3 - r_3 \times f_3 \quad (9)$$

$$v_3 = r_3 \times w_3 \quad (10)$$

J: 각 전동기의 관성, r: 각 전동기의 반지름, w: 각 전동기의 각속도, T: 각 전동기가 발생하는 토크

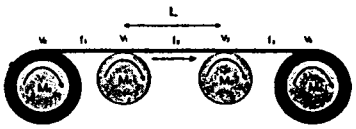

그림 2. 제어시스템의 전동기 구성.

그리고 양끝 쪽에 있는 unwinder와 winder는 반지름이 변하므로 모터 축방향의 단면적을 이용하여 모델링을 하면

$$r_0 = \sqrt{(L_t - \int_0^t v_0 dt) \times \frac{d}{\pi} + R_{min}^2} \quad (11)$$

$$r_3 = \sqrt{(\int_0^t v_3 dt) \times \frac{d}{\pi} + R_{min}^2} \quad (12)$$

여기서 Lt: 철판의 총길이, d: 철판의 두께, R_{min}: 롤러의 반지름

이를 이용하여 반지름이 변하는 롤러의 경우 관성 또한 계산할 수 있다.

2.2 제어방법

2.2.1 제어방법의 개요

전동기 중에 양쪽 끝에 있는 전동기를 각각 unwinder, winder라 하고 가운데 있는 두 롤을 브라이들롤이라 한다. 즉 M_0는 unwinder M_3는 winder M_1, M_2을 브라이들롤이라 한다. 브라이들롤중 M_2는 전체 라인의 속도를 제어하는 속도제어기로 설정하고 나머지는 장력을 제어하기 위한 토크제어기로 설정하는 것이 일반적이다. 먼저 선형화된 장력 시스템부터 고찰해 보기로 한다. M_0, M_1사이에 부과되는 장력의 제어기가 포함된 전달함수를 보면 식(13)과 같이 된다. 여기서 비교적 저속일 때에는 $\frac{v_{10}}{L}$이 매우 작게 되므로 시스템의 pole들의 실수부가 원점근처에 있게 되고 $\frac{AE}{L}$은 철판의 경우 매우 큰 값이므로 극점들의 허수부는 큰 값을 가지게 되어 비록 감쇠가 있더라도 매우 진동적이다. 즉, 외란에 매우 민감한 시스템이 되고 과도상태에서는 장력을 제어하기 어렵다. 여기서 과도상태란 장력을 설정한 뒤에 속도를 증가시키는 상태를 말한다. 또한 비록 모델링 상으로만 나타나는 현상이지만 속도가 0인 상태에서는 시스템이 완전 탄성의 특성을 지니게 되므로 속도변경에 대하여 아주 민감한 시스템이 된다.

$$\frac{f_1}{f_1^*} = \frac{(\frac{AE}{L})(\frac{2r_0^2}{J_0})K_i}{s^3 + \frac{v_{10}}{L}s^2 + (2K_p+1)(\frac{AE}{L})(\frac{r_0^2}{J_0})s + (\frac{AE}{L})(\frac{2r_0^2}{J_0})K_i} \quad (13)$$

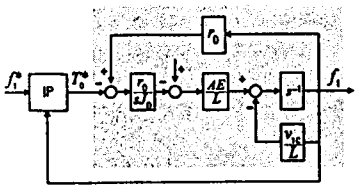

그림 3. 선형화된 장력시스템 제어블럭도.

2.2.2 제안된 제어방법

(1) 장력시스템에서 feedback linearization[5]

먼저 시스템이 비선형 모델이므로 이를 선형화할 수 있도록 지령치에 비선형의 요소를 없앨 수 있는 보상항을 더하여 전체 시스템을 선형시스템으로 만든다. 이것은 위에서 언급한 선형화(linearzation)와는 다른 것으로 선형시스템으로 만드는 것이다.

즉 그림 3에서 보이는 블록 다이어 그램에서 다음 식을 토크지령치에 더해주면 위의 시스템은 그림 4와 같이 된다.

$$\widehat{T_0^*} = T_0^* + \frac{d}{dt}(-\frac{v_0 f_1}{L}) \times \frac{r_0}{J_0} \times \frac{L}{(AE)} \quad (14)$$

T_0^* : 제어기의 출력

$\widehat{T_0^*}$: 최종 전동기의 토크 지령치

위의 식에서 뒤쪽에 있는 항이 비선형요소를 보상하는 항이 된다. 결국 위의 식과 같이 지령치를 구성하면 시스템의 모델링은 다음과 같이 선형시스템으로 된다.

$$\frac{df_1}{dt} = \frac{AE}{L}(v_1 - v_0) \quad (15)$$

(2) 미분관측기(differential observer)[6]

위에서 설명한 feedback linearization을 하기 위해서는 식(14)와 같이 두 상태변수간의 곱을 미분한 신호가 필요하고 이를 위해서 실제 미분기를 사용한다면 이는 외부 잡음에 아주 취약하게 된다. 따라서 완전한 미분기를 사용하는 것 보다 다음의 미분관측기를 이용하는 것이 언급한 잡음문제에 해결책이 될 수 있다.

* 필터의 특성

필터는 제어기의 대역폭이 약 30rad/s 정도로 정했기 때문에 300rad/s로 필터의 대역폭을 정했다. 그래서 각 계수 K_1과 K_2를 위의 대역폭에 따라 정하고 그 특성을 그림 7에 보였다. 그림에서와 같이 대역폭 아래에서는 미분과 거의 동일하다.

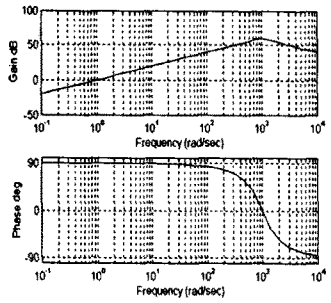

그림 7 미분관측기 필터의 특성.

(3) 제어기의 설계

선형화를 위하여 보상하는 항은 시스템내의 비선형 댐핑항인데 이 항을 없애고 다시 댐핑항을 추가로 더하여 즉, 장력의 미분항을 더하여 시스템이 안정성을 높였고 주제어기는 IP제어기이지만 전체적으로 제어기는 IP-D 제어기로 구성되었다. 다음의 그림이 제어기를 포함한 시스템의 주파수특성을 나타내고 있다.

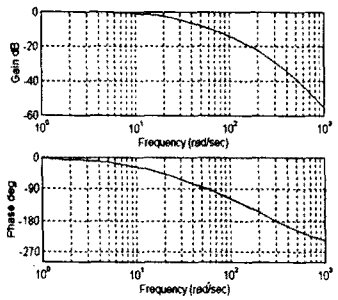

그림 8. 시스템의 주파수 특성.

2.3 모의실험

2.3.1 모의실험의 정수

철판의 밀도 ρ = 7.8e+3 [kg/m^3]

철판의 young's modulus E = 200e+9 [N/m^2]

철판의 두께 d = 0.2e-3 [m]

철판의 단면적 A = 0.06e-3 [m^2]

전동기의 반경 r = 0.1325 [m]

2.3.2 모의실험

모의실험은 다음과 같이 수행하였다. 먼저 장력의 지령치를 주고 이를 각 장력에 설정한 후 속도 프로파일에 따라 각 전동기의 속도를 증가시켰다. 장력의 지령치는 20N이고, 속도의 지령치는 실제 속도프로파일과 비슷하게 3m/s의 램프입력으로 인가하였다. 그 응답은 다음과 같다.

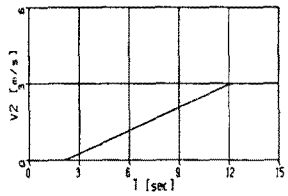

그림 9. 연속공정 시스템에서 속도의 응답.

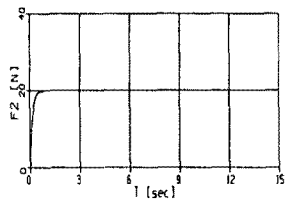

그림 10. 연속공정시스템에서 장력의 응답.

3. 결 론

제철공정에서 철판의 사행을 방지하고 품질의 저하를 막기 위해서는 철판에 부과되는 장력을 주위의 외란에 둔감하도록 제어하여야 한다. 본 논문에서는 속도와 장력의 간섭이 있더라도 장력의 변동을 억제하도록 선형화 시킨 후 댐핑을 증가시켜 장력의 응답특성을 개선하였다. 또한 제안된 방법은 한 대의 전동기가 하나의 장력을 제어하므로 다수의 전동기를 포함하고 있는 시스템에 적용이 용이할수 있으며 이를 모의 실험을 통하여 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Wolfermann, W, "Application of Decoupling and State Space Control in Processing Machines with Continuous Moving Webs", Proc IFAC, 1987

[2] 전석호,"속도와 장력간의 비간섭제어" Proc IAS, 1997

[3] 신기현, "연속공정 시스템에서의 장력의 가변이득 PID제어", 대한기계학회논문지, 제19권, 제3호, pp724-730, 1995

[4] Brian T. Boulter, "Diameter Sizing of Rolls in Bridles that Utilize Power Clutches", IA, VOL 33. NO. 3, pp797-800, 1997

[5] Jean-Jacques E. Slotine, "Applied Nonlinear Control" pp207-271, Prentice Hall, 1991

[6] Jong-Gyu Hwang et. al, "A Novel Detecting Noise Redution Scheme for Voltage Regulated Current-Fed Power Filter", IAS, 1996