

연속 공정용 전동기 구동장치를 위한 통합형 토크 및 속도제어 알고리즘

宋 丞 鎬

Integrated Torque and Speed Control Algorithm for Motor Drive System in Continuous Strip Processing Line

Seung-Ho Song

요 약

연속 공정 라인을 구성하는 롤러들의 속도뿐만 아니라 토크를 적절히 제어할 수 있는 통합형 제어를 제안하였다. 여러 대의 롤러들이 동시에 가감속 할 때 발생하는 속도 편차는 소재의 장력을 유발하여 가공중인 제품의 품질에 나쁜 영향을 미치게 된다. 제안된 통합형 제어를 사용하면 속도 기준값 편차나 속도제어기 특성차이가 존재하더라도 토크 및 속도 기준값을 잘 추종하도록 제어하는 것이 가능하다. 제안된 제어기는 가감속 등의 과도 상태에는 속도 기준 값을 추종하는 것을 위주로 하고 정상 운전속도에서는 토크 기준값에 따라 제어함으로써 인접한 롤러간의 부하를 분담하도록 설계되었다. 특히 제안된 제어기는 인접한 롤러의 제어 정보를 필요로 하지 않으므로 각각의 롤러 제어기 유닛에 쉽게 구현될 수 있다는 장점이 있다. 연속 공정 라인 모의 실험장치에서 제안된 제어기의 토크 및 속도 제어 특성을 비교 검토하였다.

ABSTRACT

A new integrated torque and speed control algorithm has been proposed for the load balancing of rollers in continuous strip processing line(CSPL). Using the proposed method, the output torque and speed can be controlled to follow the reference in spite of nonideal effects such as the speed reference error and/or the controller gain difference between rolls. This new algorithm can be easily implemented in a motor drive system of each roll as it does not require the torque feedback of the others. Through the simulation and experiments for a simple CSPL consists of four driven rolls, the load balancing performance of the proposed scheme is presented and compared with that of conventional method.

Key words : roller motor drive, torque/speed mode control, continuous strip processing line, load balance control

1. 서 론

*전북대 전자정보공학부 전임강사
E-mail : songsh@moak.chonbuk.ac.kr
접수일자 : 2002. 3. 6
1차심사요청일 : 2002. 3. 8
심사완료일 : 2002. 3.27

철강, 제지, 섬유, 필름 산업과 같은 연속적인 제품 생산 라인에서는 여러 대의 전동기가 동시에 롤러들을 구동하고 있다. 이와 같은 연속공정라인의 한 예로서 그림 1에 보인 것은 냉간 압연공장의 연속 소둔(燒鈍)

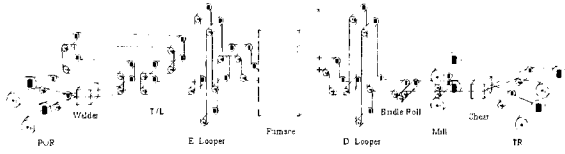


그림 1 연속공정라인의 한 예 : 연속 소둔라인(CAL) 구성도

Fig. 1 Configuration of a continuous annealing line (CAL) as an example of a continuous strip processing line

라인(Continuous Annealing Line, CAL) 구성도이다^[1]. 이와 같은 연속 공정용 롤러의 제어목적은 라인의 선속도 기준 값을 따르도록 하는 동시에 소재에 걸리는 장력을 일정하게 유지시키는 것이다. 롤러들간의 속도 편차에 의해 과도한 장력이 발생하면 소재가 파단(破斷)될 수 있으며 장력이 너무 낮아도 사행(蛇行)의 원인이 된다. 따라서 연속 공정라인의 운전속도 변화시에도 소재의 장력을 독립적으로 제어하기 위한 많은 연구가 있었다^[2~7].

또한 연속 공정라인의 여러 요소들 중에서 특히 브라이들롤, 루퍼 암(looper arm), 루퍼 타워카(tower car) 등은 전동기 출력 토크의 크기가 직접적으로 장력에 영향을 미치는 구조로 되어 있으므로 장력을 원하는 값으로 유지시키기 위해서는 전동기를 토크 모드로 제어하는 것이 필요하다.

속도제어모드로 운전되는 롤러의 부하를 균형있게 조절하는 몇 가지 방법이 연구되어져 왔다. 그 첫 번째는 “드롭(drop)제어”라고 불리는 방법으로서 동시에 운전중인 여러 대의 롤러 중에서 한 롤러의 부하가 많아지면 그에 비례하여 속도 기준값을 감소시키는 방법이다^[1] 반대로 음의 부하의 토크를 발생하고 있는 경우에는 속도기준값을 증가시켜 부하량을 늘려주게 된다. 이와 같은 방법을 사용하게 되면 매우 간단하게 각 롤러의 과부하를 방지할 수 있는 장점이 있는 반면 정상상태에 도달하더라도 부하 분담율이 일정하지 않다. 이 문제를 해결하기 위해서는 속도 감소율을 매우 주의 깊게 조절하여야 한다.

본 논문에서는 롤러간의 과도한 장력이 발생하지 않도록 하면서 속도를 효과적으로 제어하는 통합형 토크 및 속도 제어를 제안하였다. 제안된 방식은 정상상태의 개루프 토크 제어와 과도상태의 폐루프 속도제어를 결합한 형태로서 원하는 수준의 부하 평형 상태를 얻을 수 있다. 특히 본 알고리즘은 함께 구동되는 인접한 롤러의 토크 정보를 필요로 하지 않으므로 한 대

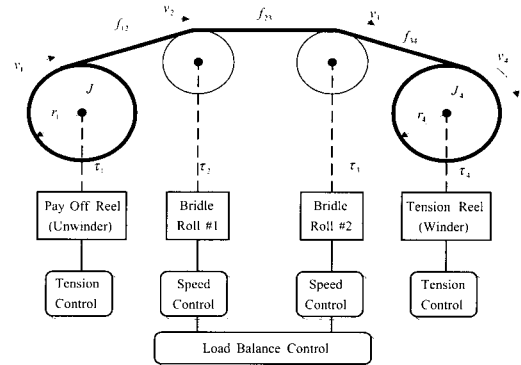


그림 2 연속공정라인의 모델링과 제어기 구성

Fig. 2 Modeling and control of a continuous strip processing line

의 전동기를 제어하는 제어기 유닛 내에 구현이 가능한 장점이 있다.

2. 연속공정라인의 모델링과 기존의 제어방식

4개의 구동롤과 제어기로 구성된 연속공정라인의 구성도를 그림 2에 나타내었다. 소재는 풀림롤(Pay-off Reel)에서 시작되어 브라이들롤 2개(BR1, BR2)를 거쳐 감김롤(Tension Reel)에 감기게 된다. 입측 장력은 풀림롤의 토크에 의해 결정되며 출측 장력은 감김롤에 의해 제어된다. 이와 같은 구성에서 라인의 운전속도는 두 대의 브라이들롤에 의해 제어된다.

2.1 연속공정라인의 모델링

POR 과 BR1의 토크와 속도사이에는 식 (1), (2)와 같은 방정식이 성립한다^[2,3]. 여기서 τ_{MLi} 는 i 번째 롤의 마찰 손실 토크를 의미한다^[8]. 또한 POR 과 BR1 사이의 스펙에서 선형화된 소재의 장력은 식 (3)과 같이 주어진다. 소재의 장력제어를 위해 식 (3)(장력에 관한 식)을 이용할 수 있지만 식 (1) 또는 식 (2)(토크 방정식)을 이용하는 것도 가능하다^[6,7].

$$\tau_1 = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} - r_1 f_{12} + \tau_{ML1} \quad (1)$$

$$\tau_2 = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} - r_2 (f_{23} - f_{12}) + \tau_{ML2} \quad (2)$$

$$\frac{df_{12}}{dt} = K_{12} (r_2 \omega_2 - r_1 \omega_1) - C_{12} f_{12} \quad (3)$$

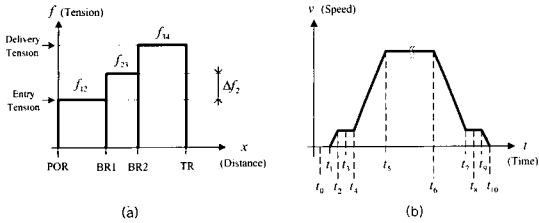


그림 3 그림 2의 연속공정라인 제어를 위한 장력 및 속도기준
 (a) 장력지도 (b) 속도기준 값
 Fig. 3 Tension and speed reference for the line of Fig. 2.
 (a) tension map (b) speed reference profile

where, $K_{12} = \frac{EA}{L_{12}} = \frac{\text{Young's modulus} \times \text{Cross-section area}}{\text{Length of the span}}$

and $C_{12} = \frac{V_0}{L_{12}} = \frac{\text{Operating speed}}{\text{Length of the span}}$

2.2 장력지도와 선속도 기준

연속공정라인 제어시 장력 기준값은 보통 작업 공정의 구간별 특성과 소재의 물성 등에 따라 라인제어기에서 결정되어진다. 예를 들어 3개의 스패를 가진 연속 공정 라인의 구간별 장력 기준값을 거리에 따라 표시한 장력지도는 그림 3(a)와 같이 나타낼 수 있다.

여기서 f_{12} 는 입측 장력, f_{34} 는 출측 장력, f_{23} 는 중간 장력을 나타내며 장력차이 $\Delta f_{12} (= f_{23} - f_{12})$ 는 정상상태에서 브라이들롤 #1(BR1)에서 공급해야 하는 토크에 해당한다.

연속 공정 라인의 선속도 기준값은 일반적으로 그림 3(b)와 같이 가속과 정속, 감속 운전 등의 조합으로 이루어지며 각 개별 전동기에 전달될 각속도 기준값은 이 선속도 기준값을 각 롤러의 반지름으로 나누어서 얻어지게 된다. 이 때 롤러의 반지름을 정확하게 아는 것이 매우 중요하며, 만일 운전중 반지름이 변화하거나 롤이 닳아서 속도 기준값에 오차가 발생하면 선속도 편차로 인해 해당 롤러의 전후 스패에 커다란 장력 오차를 유발할 수 있다.

2.3 기존의 드롭(drop) 제어기

연속 공정 라인에서 한 롤러의 속도 기준값이 다른 롤러들과 다르다면 그 롤러를 구동하는 전동기는 과도한 부하를 받게 된다. 이와 같은 경우에 간단하게 적

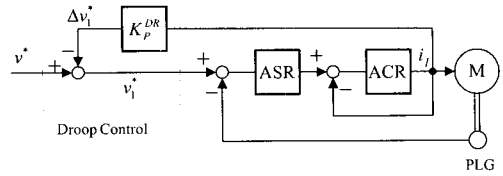


그림 4 기존의 드롭(drop) 제어기 구성도
 Fig. 4 Control block diagram of conventional droop controller

용할 수 있는 방법이 드롭(drop) 제어기이다.

드롭 제어기 알고리즘은 그림 4에 나타난 것과 같이 전동기의 부하전류에 비례상수 K_p^{DR} 를 곱하여 식 (4)에 보인 속도 기준값 보정량을 결정한다. 즉 연속 공정 라인의 어느 곳에 위치한 롤러이건 간에 부하가 많이 걸리면 그 만큼 속도 기준값을 많이 낮추고, 부하가 적으로 걸리면, 즉 끌려가고 있는 중이면, 속도 기준값을 올리는 것에 의해 궁극적으로 모든 롤러들의 선속도 기준값을 일치시키게 된다. 하지만 이 알고리즘에 의해 정상상태에 도달한 경우에도 각 롤러가 감당하는 토크의 크기는 일정하지 않다. 즉 어떤 롤러는 큰 부하를 감당하며 정상속도로 운전하는가 하면 다른 롤러는 작은 부하 전류만으로도 정상속도로 운전하게 되어 부하의 불균형은 해소되지 않고 스패의 장력도 기준값과는 다른 값에 도달하게 될 수 있다.

$$\Delta v_i^* = K_p^{DR} \tau_i \quad ; i = 1, 2, 3. \quad (4)$$

3. 제안된 통합형 토크 및 속도제어기

제안된 통합형 제어기의 블록선도를 그림 5에 나타내었다. 식 (5)의 토크 기준값은 일정한 속도에서 정상상태 장력을 유지하기 위해서 전동기 축에서 감당해야 할 부하 토크에 해당한다. 라인의 선속도 기준값 패턴이 변화하는 동안에는 식 (6)과 같이 계산된 속도기준값 보정량을 사용하고 선속도 기준값이 변화하지 않는 정속 운전 구간에서는 식 (7)에 보인 것과 같이 속도 기준값을 변동시키는 것이 제안된 알고리즘의 핵심부분이다. 식 (7)에 의하면 속도제어기 (ASR, Automatic Speed Regulator)의 출력 x가 식 (8)에 설정된 바와 같이 데드존 Δd 의 범위 이내의 값으로 제한될 수 있도록 속도기준 값을 조절하게 된다. 그 결과 정상상태 운전시 전체 토크 기준값 발생량 중에 속도제어기 출력에 의한 부분은 거의 무력화되고 별도로 계산된

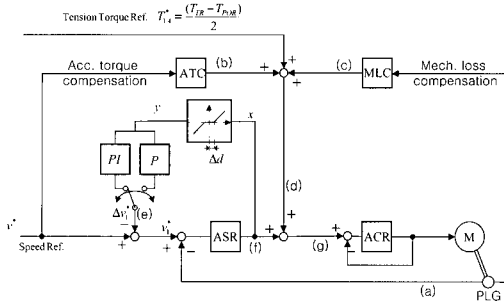


그림 5 제안된 통합형 토크 및 속도제어기 제어 블록선도
 Fig. 5 Control block diagram of proposed integrated torque and speed controller

토크 기준값이 주로 동작하게 되어 토크 모드 운전을 실시하게 된다. 한편 가감속시와 같이 과도상태 운전 시에는 식 (6)에 보인 것과 같이 속도기준 값 조절량을 (비례적인 방식이 아닌) 비례방식으로 조절하여 속도제어기의 적분항에 의한 속도 추종성을 유지시키도록 하였다.

$$\tau_{iA}^* = r_i(f_{i,i+1} - f_{i-1,i}) \quad ; i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

$$\Delta v_1^* = K_p^{pro} y \quad ; \text{과도상태} \quad (6)$$

$$\Delta v_1^* = (K_p^{pro} y + \frac{K_I^{pro}}{s} y) \quad ; \text{정상상태} \quad (7)$$

$$y = \begin{cases} x - \Delta d & , \quad \text{if } x > \Delta d \\ x + \Delta d & , \quad \text{if } x < -\Delta d \\ 0 & , \quad \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

한편 토크 기준값 계산량은 크게 3가지 성분으로 구성된다. 첫 번째 항은 식 (5)와 같은 장력분 토크 기준값으로서 해당 롤러의 입측 장력과 출측 장력의 차이를 항상 유지할 수 있도록 하기 위한 것이다. 두 번째 항은 그림 5에서 (b)지점, ATC(Acceleration Torque Compensation)출력에 해당하는 것으로서 속도 기준값의 변동시 롤러를 포함한 관성체의 가속에 필요한 토크를 미리 계산하여 토크 기준값에 반영하는 부분이다. 세 번째 항은 그림 5에서 (c)지점, MLC(Mechanical Loss Compensation)에 해당하는 것으로서 실제 회전 속도에 따라 발생하는 기계적 손실성분을 보상해 줌으로서 손실에 의한 속도저하를 막아주는 역할을 감당한다. 회전속도에 따른 손실보상량 계산은 여러 가지 방법이 있을 수 있으나 본 제어기에서는 여

러 가지 운전속도에서 무부하 운전시 회전 손실 토크 성분을 미리 측정하여 1차 함수로 근사화한 계수를 사용하였다.

$$\tau_{MLC} = a\omega_{rpm} + b \quad (9)$$

4. 실험 결과

제작된 다중 스펠 장력제어 모의 실험을 위한 장력 제어 시뮬레이터 장치^[7]를 사용하여 제안된 알고리즘을 구현하고 그 동작 특성을 실험하였다. 시뮬레이터 장치는 연속공정라인 제어를 위한 핵심 특성 요소들 즉, 폴림롤, 감김롤, 브라이들롤 등을 갖추고 있고 그 설계 사양은 표 1에 나타난 것과 같다. 각각의 구동롤러는 고성능 벡터제어 인버터 VECTROL-3000[®]으로 구동되고 있으며 각 인버터 유닛들에 설치된 통신카드를 통해 상위제어기와 속도, 토크 지령 및 피드백을 주고받을 수 있는 1:n 통신 방식을 갖추고 있다.

표 1 다중 스펠 장력 모의실험장치의 사양
 Table 1 Parameters of the multi-span tension simulator

	POR, TR	BR1, BR2
Motor Power	37 [kW]	5.5 [kW]
Motor Base Speed	1780 [rpm]	1150 [rpm]
Motor Torque	200 [Nm]	45 [Nm]
Max Speed	200 [mpm]	200 [mpm]
Acc./Dec. Rate	40 [mpm/sec]	40 [mpm/sec]
Roll radius, r	120 [mm]	90 [mm]
Inertia, J (Motor+Roll)	0.6 [kg.m ²]	0.1 [kg.m ²]
Strip Length, L	1.86 [m]	0.88 [m]
Spring Coeff.,K	3.23e+6 [N/m]	6.82e+7 [N/m]
Load Cell	Rated capacity : 100 [kgf] Rated output : 3 [mV/V]	

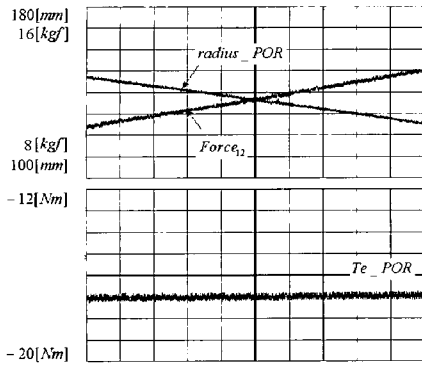


그림 6 폴림롤 토크를 일정하게 제어할 때 반지름 감소에 따른 장력 증가
 Fig. 6 Tension variation due to the roll radius decrease when the POR torque is constant

4.1 와인더 제어 알고리즘

폴림롤이나 감김롤과 같은 와인더의 제어시에는 지속적으로 변화하는 롤러의 반지름을 정확하게 아는 것이 필수적이다. 만일 폴림롤의 반지름이 감소하는 동안에 폴림롤 구동 토크를 일정한 값으로 유지하고 있다면 소재에 걸리는 장력은 점차 증가하게 될 것이다.

그림 6에서 폴림롤 (POR, Pay-off Reel)의 구동 토크를 -17[N.m]로 일정하게 제어하고 있을 때 반지름이 약 150[mm]에서 125[mm]로 감소하는 동안 장력은 10.5[kgf]에서 13.0[kgf]까지 증가한 것을 알 수 있다.

그림 7은 기계를 직결한 상태로 100[rpm]부터 500[rpm]까지 100[rpm]단위로 증가시키면서 무부하 속도제어를 수행하여 기계적 손실을 측정하는 실험파형이다. 그림 7(a)에는 실제 속도를 크게 확대하여 리플성분을 관찰하고 있고 그림 7(b)는 이때 토크분 전류로부터 계산된 무부하 평균 토크를 나타내고 있다. 속도가 증가함에 따라 속도 리플은 큰 변동이 없으나 평균 부하 토크가 점차 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 측정된 무부하 평균토크를 바탕으로 최소자승법에 의해 기계손실을 속도에 관한 1차 함수로 모델링하여 각 운전속도별 손실을 계산할 수 있다.

그림 8부터 그림 10까지는 선속도 기준값을 30[mpm]에서 130[mpm]으로 가감속 시키면서 와인더 (폴림롤 및 감김롤) 제어 전략에 따른 장력변동을 실험한 결과 파형이다. 와인더 제어에 관한 자세한 내용은 참고문헌^[6]에 자세하게 설명되어 있으므로 여기서는 결과만을 간략히 검토하도록 하겠다. 그림 8부터 그림 10 까지에 나타난 파형은 위로부터 차례대로 선속도 피드백 (V_{mpm}), 첫 번째 스펠 장력 (F_{12}), 두 번째

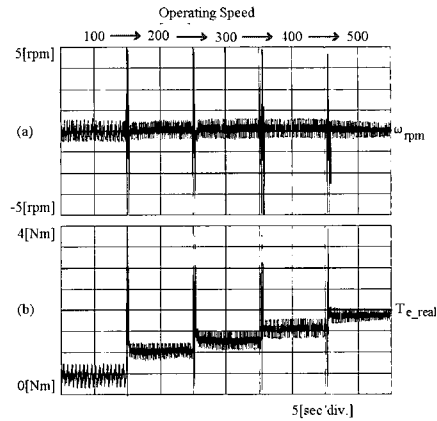


그림 7 무부하 속도제어 운전에 의한 마찰 손실 측정 시험
 Fig. 7 No load speed control characteristic for the calculation of mechanical friction loss

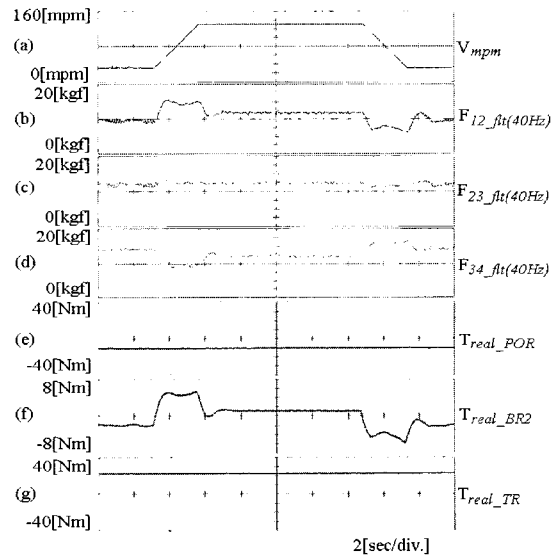


그림 8 와인더 토크 일정한 상태로 30/130[mpm] 가감속 운전시 선속도, 각 스펠의 장력, 각 전동기 토크
 Fig. 8 Line speed, strip tensions, and motor torques during speed change between 30 and 130[mpm] without appropriate compensation algorithms in winder control

스펠 장력 (F_{23}), 세 번째 스펠 장력 (F_{34}), 폴림롤 토크 (T_{POR}), 브라이들롤2 토크 (T_{BR2}), 감김롤 토크 (T_{TR})에 해당한다. 각 실험파형에서 브라이들롤 #1의 토크는 오실로스코프 채널수가 제한되어 표시하지 못했으나 브라이들롤 #2와 사양 및 모든 조건을 동일하게 맞추었으므로 비슷한 파형을 얻을 수 있었다.

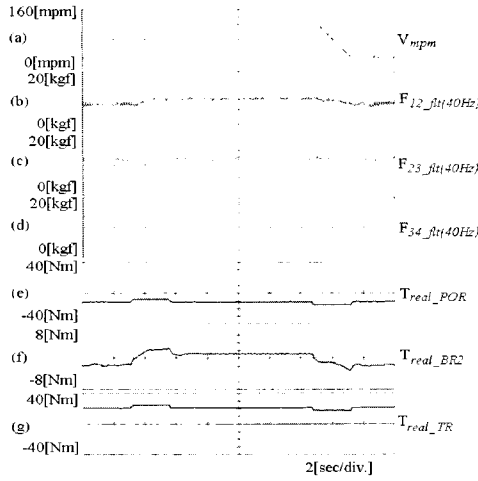


그림 9 와인더에 가감속 보상을 고려한 경우 30/130[mpm] 가감속 운전시 선속도, 각 스펀의 장력, 각 전동기 토크
 Fig. 9 Line speed, strip tensions, and motor torques during speed change between 30 and 130[mpm] with acceleration compensation

그림 8은 와인더(풀림롤, 감김롤)측 토크 기준값 설정시 아무런 보상을 하지 않은 경우 가속구간과 감속구간에서 최대 약 6[kgf]의 장력 변동이 발생되고 있으며, 가속후 정속 운전 구간에서도 시스템의 마찰손실을 보상해 주지 않음으로 인해서 풀림롤 장력은 약 2[kgf]증가하고 감김롤 장력은 약 2[kgf] 감소한 것을 알 수 있다. 이러한 상황에서는 브라이들롤러가 전체 시스템의 가감속을 위한 속도제어를 수행하게 되어 과도한 토크를 필요로 할 뿐만 아니라 응답성도 나빠지게 된다. 본래 브라이들 롤러의 단독 관성에 비해 훨씬 큰 등가 관성을 가진 전체 시스템의 속도제어를 담당하게 되었기 때문이다.

그림 9에서는 와인더(풀림롤 및 감김롤)의 토크 기준값 설정시 라인의 선속도 가감속에 필요한 토크를 미리 보상하여 줌으로서 가감속 구간에서의 장력변동을 획기적으로 개선하였다. 브라이들 롤러가 담당하는 토크 또한 상당히 감소하였음을 확인할 수 있다. 그러나 가속이 끝난 후 고속운전 영역에서 와인더측 회전손실을 고려하지 않았기 때문에 장력이 기준값과 다르게 나타나고 있다. 그림 10에서는 와인더측 토크 기준값 결정시 장력분, 가감속 보상분 및 마찰손 보상분을 함께 고려 함으로써 소재의 각 스펀에서 장력도 일정하고 각롤러들의 구동 토크도 적절히 분담되어 구동되고 있는 것을 알 수 있다.

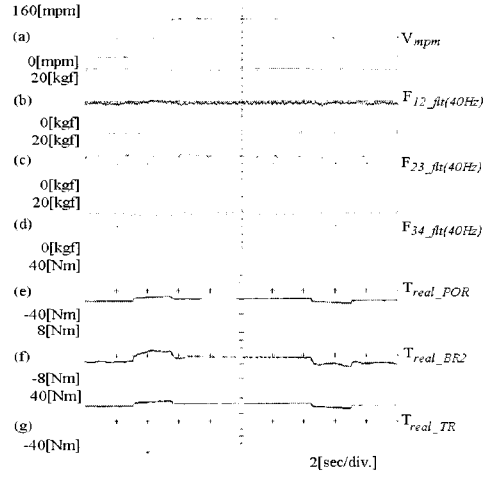


그림 10 가감속 보상과 마찰손실보상을 포함한 와인더 제어의 경우 30/130[mpm] 가감속 운전시 선속도, 각 스펀의 장력, 각 전동기 토크
 Fig. 10 Line speed, strip tension, and motor torques during speed change between 30 and 130[mpm] with acceleration and friction loss compensation

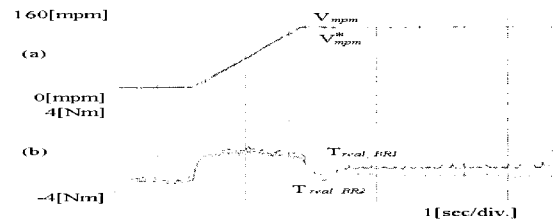


그림 11 이상적인 경우 ($r_{BR1} = r_{BR2} = 90 [mm]$, $\omega_{scBR1} = \omega_{scBR2} = 20 [rad/s]$) 30→130[mpm] 가속운전시 브라이들 롤러의 토크 출력특성
 Fig. 11 Ideal operation of connected two motors with $r_{BR1} = r_{BR2} = 90 [mm]$, $\omega_{scBR1} = \omega_{scBR2} = 20 [rad/s]$

4.2 제한된 통합형 토크 및 속도제어기 특성

그림 11은 BR1과 BR2의 모든 제어 특성을 동일하게 맞춘 이상적인 경우에 대한 가속 운전 실험 결과이다. 각 롤러의 반지름 $r_{BR1} = r_{BR2} = 90 [mm]$ 로 일정하게 설정하고 속도제어기 응답특성 이득 또한 $\omega_{scBR1} = \omega_{scBR2} = 20 [rad/s]$ 로 동일하게 설정한 상태로 선속도 기준값을 30 [mpm]에서 130 [mpm]으로 가속하면서 각 브라이들 롤러의 토크 출력특성을 관찰하였다.

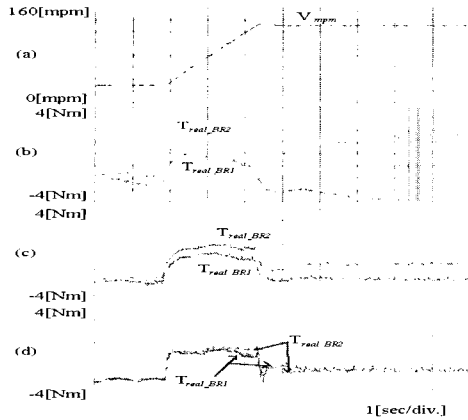


그림 12 BR1측 속도기준값에 오차가 있는 경우 가속운전 실험파형
 $(r_{BR1} = 90.45[mm], r_{BR2} = 90[mm], \omega_{scBR1} = \omega_{scBR2} = 20[rad/s])$
 (a) 선속도
 (b) 아무런 보상도 하지 않은 경우 두 브라이들 롤러의 토크 출력
 (c) 기존의 드롭(droop) 제어를 사용한 경우 두 브라이들 롤러의 토크 출력
 (d) 제안된 통합형 제어기를 사용한 경우 두 브라이들 롤러의 토크 출력

Fig. 12 Speed and torque characteristic comparison during acceleration with speed reference error in BR1
 (a) Line speed
 (b) Without any compensation for the speed error
 (c) With droop compensation algorithm
 (d) With proposed algorithm

그림 12에서는 BR1의 반지름을 실제보다 5% 크게 설정함으로써 BR1의 각속도 기준값이 BR2의 각속도 기준값보다 더 작게 설정되도록 한 상태로 가속을 실시한 경우의 실험파형이다. 이러한 경우 그림 12(b)에 보인 것과 같이 같은 선속도 기준값을 인가해도 BR2는 상대적으로 높은 각속도 기준값으로 운전하기 위해 출력 토크를 계속 증가시키고, BR1은 반대로 출력 토크를 낮추게 되어 서로 충돌 현상을 빚고 있으며, 이때 BR1과 BR2 사이에 위치한 소재는 과도한 장력을 받게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 그림 12(c)는 기존의 드롭(droop)제어방법으로 각 롤러의 부하 토크에 비례하여 속도기준값을 어느 정도 가감하는 것에 의해 시스템이 발산하지는 않고 안정상태에 도달한 것이다. 그러나 고속운전시 각 롤러의 구동 토크는

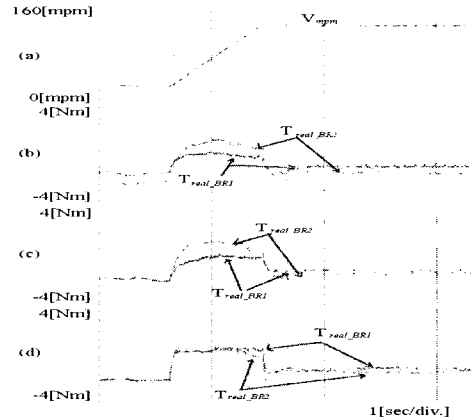


그림 13 BR1측 속도제어기 이득이 낮은 경우 가속운전 실험파형
 $(r_{BR1} = r_{BR2} = 90[mm], \omega_{scBR1} = 14[rad/s], \omega_{scBR2} = 20[rad/s])$
 (a) 선속도
 (b) 아무런 보상도 하지 않은 경우 두 브라이들 롤러의 토크 출력
 (c) 기존의 드롭(droop) 제어를 사용한 경우 두 브라이들 롤러의 토크 출력
 (d) 제안된 통합형 제어기를 사용한 경우 두 브라이들 롤러의 토크 출력

Fig. 13 Speed and torque characteristic comparison during acceleration with speed controller gain error in BR1
 (a) Line speed
 (b) Without any compensation for the speed error
 (c) With droop compensation algorithm
 (d) With proposed algorithm

서로 다른 크기를 가지고 있으며 이것은 중간지점 장력이 본래의 값과는 차이가 있음을 의미한다. 마지막으로 그림 12(d)에는 동일한 실험조건으로 5%의 반지름 오차를 가진 경우에 제안된 통합형 토크 및 속도제어기의 운전특성을 보여주고 있다. 상당한 속도 기준값 오차에도 불구하고 과도상태 가속구간에서 뿐만 아니라 정상상태 운전시에도 양쪽 브라이들 롤러의 토크 분배가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

그림 13에서는 두 브라이들 롤러의 속도 기준값은 동일하게 유지하고 속도제어기 응답특성은 다르게 하여 각 알고리즘별로 동작특성을 비교하였다. BR1과 BR2의 속도제어기 이득을 각각 $\omega_{scBR1} = 14[rad/s]$, $\omega_{scBR2} = 20[rad/s]$ 로 설정하여 BR1의 속도제어 응답

특성이 BR2보다 30% 낮게 설정하고 가속 운전을 수행한 결과 그림 13(b)에서 보는 바와 같이 가속구간에서 BR1 토크가 느리게 반응하여 BR2가 상대적으로 큰 토크를 부담하게 된다. 속도기준값의 오차는 없으므로 가속이 끝난 후의 토크는 안정된 상태를 보이고 있다. 그림 13(c)는 기존의 드롭(droop)제어 보상 알고리즘에 의한 실험 결과이고 그림 13(d)는 제안된 통합형 제어기를 사용한 운전특성 결과이다. 기존의 드롭(droop)제어에 비해 과도상태와 정상상태 모두 제안된 방식의 부하토크 분담효과가 매우 우수하여 중간 장력도 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

연속공정라인의 롤러를 구동하는 시스템에서 롤러의 부하를 효과적으로 분담할 수 있는 통합형 토크 및 속도제어 알고리즘을 새롭게 제안하였다. 연속공정의 속도 및 장력 제어를 위해서는 각 롤러가 발생하는 토크의 크기가 적절히 분담되어야 할 뿐만 아니라 회전체가 가속에 필요한 에너지와 일정속도 운전에 필요한 손실분에너지를 적절히 공급해 주어야 함을 보였다. 제안된 알고리즘을 사용하면 롤러간의 속도기준값 편차가 존재하거나 속도제어기 응답특성이 다른 경우에도 과도상태 및 정상상태 부하 토크 분담 특성이 매우 우수하여 효과적으로 장력을 제어할 수 있다. 본 알고리즘은 인접한 다른 롤러의 토크 정보를 필요로 하지 않으므로 개별 전동기 구동장치에 손쉽게 구현될 수 있는 장점이 있다. 4대의 구동롤과 3개의 독립된 스펠스로 구성된 연속공정 모의 실험장치에서 다양한 실험을 통해 제안된 알고리즘의 동작특성이 우수함을 보였다.

본 연구는 (00-지역-03) 한국전력공사 지원으로 기초전력공학 공동연구소 차세대 풍력발전 연구센터 주관으로 수행된 연구 결과의 일부입니다.
논문실험에 도움을 주신 (주)포스콘 전력전자연구팀 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] POSCO Eng. Dept., "Cold Rolling Mill Engineering", Technical Report, 1996.
[2] Kee-Hyun Shin, "Distributed Control of Tension in Multi-span Web Transport System", Ph. D. Thesis, Oklahoma State Univ., 1991.

[3] K.N.Reid and K.C.Lin, "Control of Longitudinal Tension in Multi-span Web Transport Systems During Start Up", Proc. of International Conference of Web Handling IWEB3, pp. 77~95, 1995.
[4] W. Wolfemann, and D. Schroeder, "Application of Decoupling and State Space Control in Processing Machines with Continuous Moving Webs", Proc. of IFAC, vol. III, pp. 100~105, 1987.
[5] Seok-Ho Jeon, Jang-Mok Kim, Kyung-Chul Jung, Seung-Ki Sul, and Jin-Young-Choi, "Decoupling Control of Bridle Rolls for Steel Mill Drive System", IEEE Trans. on Industry Applications Vol. 35, No. 1, pp. 119~125, 1999.
[6] Seung-Ho Song and Seung-Ki Sul, "A New Tension Controller for Continuous Strip Processing Line", IEEE Trans. on Industry Applications Vol. 36, No. 2, pp. 633~639, 2000.
[7] Seung-Ho Song and Seung-Ki Sul, "Design and Control of Multi-span Tension Simulator", IEEE Trans. on Industry Applications Vol. 36, No. 2, pp. 640~648, 2000.
[8] Jeong-Uk Lee, Chang-Ho Choi, Seung-Ho Song, Seung-Ki Sul, and Dong-Seuk Hyun, "On-Line Compensation of Friction Loss for Continuous Strip Processing Line", IEEE IAS Annual Meeting Conf. Rec., pp. 2125~2130, 2000.
[9] B.T. Boulter, "The Effect of Speed Loop Bandwidths and Line-speed on System Natural Frequencies in Multi-Span Strip Processing System", IEEE Trans. on Industry Applications Vol. 35, No. 1, pp. 126~134, 1999.
[10] 권병기, 최창호, 현동석 "연속공정라인에서 벡터제어용 유도전동기의 오프라인 파라미터 추정", 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No. 1, pp. 88~94, 2000, 2.
[11] 이재왕, 김상훈, "관성능률 추정과 가속도 전향보상을 이용한 유도전동기의 속도제어 성능향상", 전력전자학회 논문지, Vol. 6, No. 1, pp. 90~97, 2001, 2.

저 자 소 개



송승호(宋丞鎬)

1968년 8월생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1992~1995년 포스콘 기술연구소 연구원. 2000년~현재 전북대학교 전자정보공학부 전임강사. 차세대 풍력발전 연구센터 연구원.