

직접 STR을 이용한 웹 이송 시스템에서의 장력제어

Tension Control in Web Transport System using Direct Self-tuning Regulator

오기석*, 권태중**, 한창수***, 강남기****, 조형진****

(*한양대학교 대학원 기전공학과, **한양대학교 대학원 정밀기계공학과)

(***한양대학교 기계공학과, ****전자부품종합기술연구소)

ABSTRACT

The purpose of this paper is to study the tension control in a web transport system. Direct self-tuning regulator method was applied to tension controller and variable-gain PID control algorithm was applied to web speed controller. The designed controllers compensated for the time-varying parameters and tracked reference tension in process speed changing. The simulation shows that direct STR tension controller improves tension control performance in comparison with other controllers.

1. 서론

정밀한 장력제어 시스템 개발에 관한 연구는 고품질, 고부가가치의 소재를 생산하는 분야에서 많은 관심의 대상이 되고 있다. 예를 들어, 냉 압연(cold rolling)시 정확한 장력의 유지가 필요하며, 필름, 케이블 등과 같은 웹 재료의 이송 시에도 고른 품질을 보장하기 위해서 적절한 장력의 유지가 필요하다.

장력을 제어하기 위한 방법으로는 마찰판을 이동시켜 마찰토크로 장력을 제어하는 방식^[1], dancer roll의 위치를 변화시켜 이송되는 웹의 장력을 제어하는 방식^[2], looper arm의 각도를 변화시켜 장력을 제어하는 방식^[3], 두개의 모터를 동기(synchronous) 운전하여 그 속도차를 장력제어에 이용하는 방식이 있으며, 최근에는 전기 유동 유체(electro-rheological fluid)를 장력제어에 이용하는 연구^[4]가 활발히 진행되고 있다.

Shin^[5]은 연속 공정 시스템에서의 웹의 장력에 관한 모델링 및 가변이득(variable-gain) PID 제어에 관하여 연구하였고, Stoten^[6]은 minimal control synthesis 알고리즘을 자기 테이프(magnetic tape)에서의 장력제어에 적용하였으며, Yeung^[7] 등은 퍼지 제어(fuzzy control)를 이용하여 가는 선(wire) 재료를 고속으로 감을 때의 장력 제어에 관한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 칩 인덕터 제조 공정 중에서, 1차

press와 2차 press 타발 위치로 필름을 이송할 때 소재의 장력 변동을 최소로 하는 제어기의 설계와 기준 속도로 이송하기 위한 속도 제어기의 설계를 목적으로 한다.

칩 인덕터 적층 시스템에서 필름의 장력 제어를 위해 폴림롤과 감김롤에서 직접 STR(direct self-tuning regulator)법을 이용한 장력 제어기를 설계했으며, 소재를 원하는 속도로 이송시키기 위한 MSD(master speed drive) 제어기로 가변이득(variable-gain) PID 제어기를 설계하였다.

직접 STR법은 플랜트의 매개변수를 추정없이 다시 매개변수화(reparameterization)함으로써 기준 모델이 제어변수에 관하여 표현되도록 한다. 이렇게 하므로써 제어변수들이 직접 조절되어 플랜트와 모델의 출력 오차를 최소화하는 방법이다.

또한, 가변이득 PID 제어기는 기존 PID 제어기의 이득값(gain)들이 시스템의 변화에 따라 보상되는 방식이다. 이 가변이득 PID 제어기는 기준 속도 궤적에 대해 시스템의 변화 후에도 만족할 만한 성능을 나타내었다.

2. 시스템 모델링

2.1 시스템 개요

칩 인덕터 적층 시스템에서 각 소재의 장력을 일

것하게 유지하며 이송시키기 위한 요소로 소재를 풀고 다시 감는 풀림롤과 감김롤이 있다. 칩 인덕터의 주재료인 페라이트 필름의 이송은 base 필름에 부착되어 이송하게 되는데, 이 base 필름은 1차 press 후 롤에 감겨 제거되며 페라이트 필름만 2차 press-발 위치로 이동하게 된다. 필름의 정밀 가공 기술이 상당히 밀접한 영향을 나타내는 소재의 장력은 이들 각 롤의 속도차에 의하여 변하게 된다. 또한 풀림롤과 감김롤에서는 소재가 이송함에 따라 롤 반경이 변화하며, 이에 따라 관성 모멘트가 증가 또는 감소한다. 이러한 롤 반경 및 관성 모멘트의 변화는 시스템 모델 자체가 변하는 시변 시스템(time-varying system)을 형성하게 되므로 이런 현상들을 고려하여 모델링을 하여야 한다. 각 롤러를 안정적으로 구동하기 위한 제어기 설계의 첫번째 단계로써, 소재의 장력 변화 현상을 고려한 시스템의 수학적 모델링을 유도하기로 한다.

다음의 Fig.1은 칩 인덕터 적층 시스템의 구성을 나타낸다.

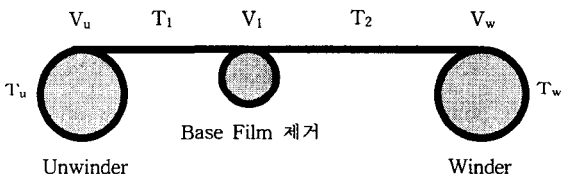


Fig. 1 Schematic diagram of the system

2.2 각 스펠에서의 소재에 대한 장력 모델

웹 재료는 중간 제품 또는 완제품을 제조하는 과정에서 일련의 연속적인 공정을 거치게 되는데, 이때 웹 이송 시스템에서의 장력 제어를 위한 이상화된 수학적 모델은 다음과 같다.^{[5][9]}

각 스펠에서의 소재에 대한 장력 모델은 다음과 같은 식이 된다.

$$L_n \dot{t}_n = V_n(E_n A_n - t_n) - V_{n-1}(E_{n-1} A_{n-1} - t_{n-1}) \quad (1)$$

2.3 소재의 속도에 대한 수학적 모델

롤러의 원주 방향 접선 속도와 웹 장력간의 관계는 롤러의 토크 평형식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.^{[5][8]}

$$J_n \frac{dV_n}{dt} = -B V_n + R_n^2 (T_{n+1} - T_n) + R_n K U_n \quad (2)$$

이 식에서 롤러의 베어링 마찰을 무시하면 소재의 속도에 대한 수학적 모델은 다음과 같다.

$$J_n \dot{V}_n = R_n^2 (t_{n+1} - t_n) + R_n K U_n \quad (3)$$

2.4 시스템의 운동 방정식

시스템을 묘사하는 운동 방정식은 식(1),(3)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_u \dot{V}_u = R_u^2 (t_1 - t_u) - R_u K U_u \quad (4)$$

$$L_1 \dot{t}_1 = V_1(E_1 A_1 - t_1) - V_u(E_u A_u - t_u) \quad (5)$$

$$J_1 \dot{V}_1 = R_1^2 (t_2 - t_1) + R_1 K U_1 \quad (6)$$

$$L_2 \dot{t}_2 = V_w(E_2 A_2 - t_2) - V_1(E_1 A_1 - t_1) \quad (7)$$

$$J_w \dot{V}_w = R_w^2 (t_w - t_2) + R_w K U_w \quad (8)$$

3. 제어기 설계

풀림롤의 반경 및 관성 모멘트의 시간에 따른 변화로 인하여 시스템 모델이 변화하므로, 풀림롤로부터 풀려 나오는 소재의 장력을 제어하기 위해서 모델 변화를 추종할 수 있는 제어 시스템이 필요하다. 이와 같은 시스템의 장력 제어를 위해서 직접 STR 제어기를 설계하고, 소재의 이송 속도 제어를 위해서 base 필름 제거 롤, 즉 MSD(master speed drive)에는 가변 이득 PID 제어기를 설계한다.

Feedback 되는 소재의 장력은 각 롤의 속도차에 의하여 계산되므로 각각의 롤러의 구동은 각 제어기에 의해 정확히 구동되어야 한다. 장력 제어를 위한 전체 제어 구성도는 Fig.2와 같다.

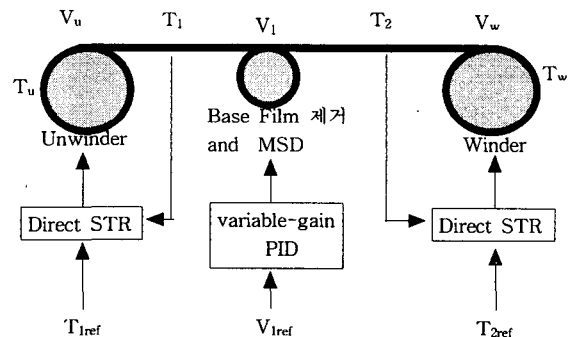


Fig.2 Controller for the tension control system

3.1 풀림을 장력 제어기

특정 시각에 대하여 장력 모델식을 Taylor 급수 전개에 의하여 선형화한 장력 모델은 다음과 같다.

$$\frac{dT_1}{dt} = -\frac{V_{10}}{L_1} T_1 + \frac{(EA - T_{10})}{L_1} V_1 - \frac{(EA - T_u)}{L_1} V_u \quad (9)$$

여기서, T_1 : 소재의 장력

V_{10} : 특정 시각에서의 소재의 속도

T_{10} : 특정 시각에서의 소재의 장력

식(4), (9)로부터 입력 U_u 과 장력 T_1 과의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_1 = \frac{G_1(s)}{G_D(s)} V_1(s) + \frac{G_2(s)}{G_D(s)} U_u(s) \quad (10)$$

$$\text{여기서, } G_1(s) = \frac{(EA - T_{10})}{L_1} s$$

$$G_2(s) = \frac{(EA - T_u)}{J_u L_1} R_u K$$

$$G_D(s) = s^2 + \frac{V_{10}}{L_1} s + \frac{(EA - T_u)}{J_u L_1} R_u^2$$

따라서 장력 T_1 과 풀림을 제어 입력과의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$T_1(s) = \frac{\frac{(E_1 A_1 - T_u)}{J_u L_1} R_u K}{s^2 + \frac{V_{10}}{L_1} s + \frac{(E_1 A_1 - T_u) R_u^2}{J_u L_1}} U_u(s) \quad (11)$$

위의 모델을 이산 시간계에서의 차분방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_1(t) = s_0 T_{1f}(t) + s_1 T_{1f}(t-1) + r_0 u_w(t) + r_1 u_w(t-1) \quad (12)$$

$$\text{여기서, } u_w(t) + a_{m11} u_w(t-1) + a_{m12} u_w(t-2) = u_u(t)$$

$$T_{1f}(t) + a_{m11} T_{1f}(t-1) + a_{m12} T_{1f}(t-2) = T_1(t)$$

여기서 각 계수들은 시스템의 운전에 의해 시변 특성을 가진다. 이와 같이 시스템의 매개변수들이 변동하는 상황에서 장력을 제어하기 위해서는 각 변수들을 실시간 추정하여 제어신호를 재구성하여야 한다.

위 식(12)에서 다항식의 계수들을 RLS(recursive least square) 알고리즘에 의해 추정하며, 추정된 계수들로 입력 제어 신호를 만든다.

$$\hat{r}_0 u_w(t) + \hat{r}_1 u_w(t-1) = \hat{t}_0 u_{uc}(t) - \hat{s}_0 T_1(t) - \hat{s}_1 T_1(t-1) \quad (13)$$

$$\text{여기서, } T_1^* = A_o^* A_m(1) = \hat{t}_{10} = 1 + a_{m11} + a_{m12}$$

$$\text{deg } A_o = d_0 - 1$$

$U_u(t)$: 제어입력(control input)

$U_{uc}(t)$: 명령입력(command input)

3.2 감김을 장력제어기

풀림을 제어기 설계와 같은 방법으로 장력 T_2 와 감김을 제어 입력과의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$T_2(s) = \frac{\frac{(E_2 A_2 - T_{20u})}{J_w L_2} R_w K}{s^2 + \frac{V_{20}}{L_2} s + \frac{(E_2 A_2 - T_{20}) R_w^2}{J_w L_2}} U_w(s) \quad (14)$$

식 (14)를 이산 시간계에서의 차분방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_2(t) = s_0 T_{2f}(t) + s_1 T_{2f}(t-1) + r_0 u_w(t) + r_1 u_w(t-1) \quad (15)$$

$$\text{여기서, } u_w(t) + a_{m21} u_w(t-1) + a_{m22} u_w(t-2) = u_w(t)$$

$$T_{2f}(t) + a_{m21} T_{2f}(t-1) + a_{m22} T_{2f}(t-2) = T_2(t)$$

위 식(15)에서 다항식의 계수들을 RLS 알고리즘에 의해 추정하며, 추정된 계수들로 다음과 같이 입력 제어 신호를 만든다.

$$\hat{r}_0 u_w(t) + \hat{r}_1 u_w(t-1) = \hat{t}_0 u_{uc}(t) - \hat{s}_0 T_2(t) - \hat{s}_1 T_2(t-1) \quad (15)$$

$$\text{여기서, } T_2^* = A_o^* A_m(1) = \hat{t}_{20} = 1 + a_{m21} + a_{m22}$$

$$\text{deg } A_o = d_0 - 1$$

$U_w(t)$: 제어입력(control input)

$U_{uc}(t)$: 명령입력(command input)

3.3 MSD(Master Speed Drive) 제어기 설계

Base 필름을 제거하는 롤러는 소재의 속도를 기준 궤적에 따라 정확히 유지하고 원하는 장력으로 제어하기 위한 MSD(master speed drive)로 사용되며,

이에 대한 가변이득 PID 제어기는 다음과 같이 설계한다.

식 (6)에서 T_1 과 T_2 가 같다고 가정하면

$$V_1(s) = \frac{R_1 K}{J_1 s} U_1(s) \quad (16)$$

$$U(s) = (K_P + \frac{K_I}{s} + K_D) e(s)$$

$$e(s) = V_{1ref} - V_1(s)$$

이 되며, 따라서 전달함수로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{V_1(s)}{V_{1ref}(s)} = \frac{b_1 s^2 + b_2 s + b_3}{a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \quad (17)$$

여기서, $a_1 = J_1 + R_1 K K_P$

$$a_2 = R_1 K K_I$$

$$a_3 = R_1 K K_D$$

$$b_1 = R_1 K K_P$$

$$b_2 = R_1 K K_I$$

$$b_3 = R_1 K K_D$$

이 식은 2차 시스템을 나타내므로 특성 방정식을 $s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0$ 라 놓고 계인 값을 구하면 다음과 같다.

$$K_P = \frac{2\zeta\omega_n}{R_1 K}$$

$$K_I = \frac{\omega_n^2}{R_1 K}$$

$$K_D = \frac{1 - J_1}{R_1 K}$$

4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 직접 STR 제어기, 가변 이득(variable-gain) PID 제어기, PID 제어를 각기 비교함으로써 직접 STR 제어기, 가변 이득(variable-gain) PID 제어기의 성능 효율성을 각각 검증하였다.

각 제어기의 성능 비교는 시스템이 변화되지 않은 상태 즉, 초기 시스템의 계인 값을 설정해 놓은 상태에서의 장력의 변화와 시스템이 Fig.3의 속도 궤적에 따라 여러번의 공정이 진행된 후, 시스템의 변수가 변했을 때의 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

각각의 시뮬레이션은 속도 궤적에 따라 속도가 변하는 구간(가속 구간, 일정 속도 구간, 감속 구간)에서의 장력변화를 살펴보았으며, 처음 시작시에는 임의의 장력을 갖고 있다고 가정하였다.

소재 이송시의 기준 속도 궤적은 아래의 Fig.3과 같다.

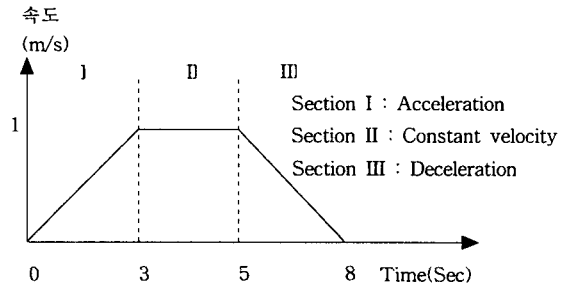


Fig.3 Velocity Trajectory of the Film

4.1 각 제어기의 성능 비교

4.1.1. 초기 상태에서의 각 제어기의 성능 비교

Fig.4~Fig.9는 시스템 초기에 각 제어기의 계인 값을 설정하여 PID, 가변이득 PID 제어기와 직접 STR 제어기의 성능을 비교하여 나타내었다.

Fig.4로부터 장력 T_1 은 직접 STR 및 가변 이득 PID 제어기, 그리고 PID 제어기 모두 큰 오버슈트 없이 약 0.3초 이내에서 목표 장력에 도달하였다. 직접 STR 제어기에서의 오버슈트는 초기의 매개변수 추정 때문에 일어나는 것이다.

Fig.5, Fig.6은 일정 속도 및 감속 구간에서의 장력 T_1 의 변화이다. 오버슈트는 직접 STR 제어기가 가장 크다. 이는 속도의 변화에서 오는 제어기의 속도 및 장력의 변화에 대한 추정 오차 때문에 일어나는 것이다. 역시, 가변 이득 PID 제어기에서도 약간의 진동 현상이 발생하였다.

Fig.7~Fig.9는 각 제어기에 대한 장력 T_2 의 변화이다. 잘 조절된 PID 제어기가 약간 좋은 성능을 보였지만, 직접 STR 제어기와 비교해서 큰 차이는 없다.

4.1.2. 시스템 변화 후의 각 제어기의 성능 비교

Fig.10~Fig.15는 속도 궤적에 따라 여러번의 과정을 거친 후의 각 제어기의 성능에 따른 장력 T_1 , T_2 의 변화를 나타낸다. 이때, 풀림률과 감김률의 반경과 관성이 변화하게 되어 시스템 가동시 소재의 장

력에 영향을 준다.

Fig.10은 가속시 장력 T_1 의 변화를 나타낸다. PID 제어기는 다른 제어기와 비교하여 오버슈트가 가장 크게 발생하였고 제어 목표로의 수렴도 느리다. 직접 STR 제어기와 가변이득 PID 제어기의 성능이 좋음을 볼 수 있다.

Fig.11, Fig.12는 일정 속도 및 감속 구간에서의 장력 T_1 의 변화이다. PID 제어기는 매우 큰 장력의 변화와 함께 시간 내에 수렴하지 못했다. 가변이득 PID 제어기도 수렴은 했지만, 직접 STR 제어기 보다 큰 오버슈트를 보이며 약간 느리게 목표 장력에 수렴했다. 또한 약간의 정상 상태 오차도 있다.

Fig.13은 가속시 장력 T_2 의 변화이다. 각각의 제어기가 비슷한 성능을 보였다. 그러나, 일정 속도 및 감속구간에서 장력 T_2 의 변화는 Fig.14, Fig.15에서 볼 수 있듯이 PID 제어기에서는 큰 폭의 장력의 변동이 있고, 시간 내에 목표 장력에 수렴하지 못했다. 가변이득 PID 제어기 또한 빠른 시간에 수렴하지 못하고 장력의 변동 현상이 있었다.

결과에서 나타난 것처럼 PID 제어기는 시스템의 변화에 대처하지 못하기 때문에 장력의 변화가 커짐을 알 수 있다. 또한 가변이득 제어기도 시스템의 변화에 따라 각각의 제어 이득값(gain)을 보상해서 시스템의 변화를 수용하지만, 소재의 이송 속도의 급격한 변화와 시스템 변수들의 많은 변화에는 빠르고 안정하게 대처하지 못했다.

본 연구에서 설계한 직접 STR 법을 이용한 제어기는 시스템이 변화해도 이 변화를 잘 추종하여 언제나 비슷한 장력 변화를 나타내고 0.5초 이내에서 목표 장력에 수렴하였다.

5. 결론

본 논문에서는 직접 STR법을 웹 이송 시스템에서의 장력 제어에 적용하여 제어기를 설계하였고, 이를 기존의 PID 제어기와 가변이득 PID 제어기와 그 성능을 비교하였다.

각각의 시뮬레이션 결과는 속도 변화에 따른 장력의 추종성이 기존의 PID 제어기와 가변이득 PID 제어기에 비해서 안정적이고 빠른 수렴을 보였다. 전체적으로 만족할 만한 성능을 보이지만, 각 속도의 변화구간에서 발생하는 오버슈트를 더욱 줄이기 위한 연구가 필요하다.

소재의 이송속도 제어를 위한 MSD의 가변이득 제어기 역시 시스템의 변화를 잘 추종하였다.

참 고 문 헌

1. Yokoyama, E. Nagasawa, M and Mori, "Precision tension control system for VCR usion moving tape guide actuator", *IEEE Trans. Industrial Electronic Eng.*, Vol. 113, No. 10, pp. 1170-1176, 1993.
2. John E. Ludwicki and Raman Unnikrishnan, "Automatic control of unwind tension in film finishing applications", *IECON*, pp.774-779, 1995.
3. Masanori Shioya, Naoharu Yoshitani and Takatsugu Ueyama, "Noninteracting control with disturbance compensation and application to tension-looper control for hot strip mill", *IECON*, pp.229-234, 1995.
4. 최승복, 김기우, 박우철, 정재천, "ER 브레이크 작동기를 이용한 능동 장력 제어", *한국정밀공학회지 제13권 8호*, pp 102-111, 1996.
5. K.N Reid, K.H. Shin, K.C. Lin, "Variable-gain control of longitudinal tension in a web transport system", *AMD Vol.149, Web Handling*, ASME, pp. 87-100, 1992.
6. D.P. Stoten and M.G. dye, "The application of minimal control synthesis to web tension and transport control", *IECON*, pp. 2019-2023, 1993.
7. M.F. Yeung and A.H. Falkner and S. Gergely, "The control of tension in textile filament winding", *Journal of Mechatronics*, 1995.
8. D.P.D Whitworth, "Tension variations in pliable material in production machinery", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 7, pp.169-196, 1983.
9. 신기현, 권순오, "변속시 멀티 스펠 연속 공정 시스템에서의 장력제어", *한국정밀공학회 추계학술대회 논문집*, pp.584-589, 1995.

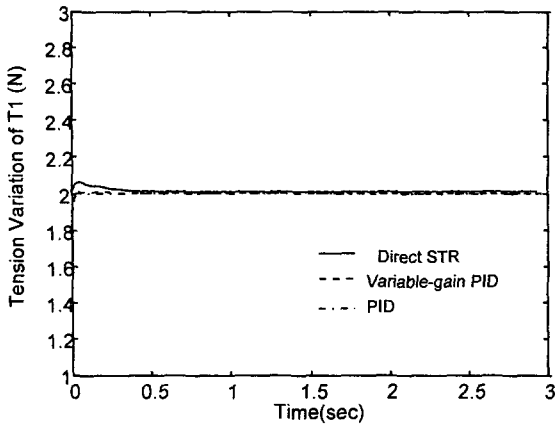


Fig.4 Comparison with each controller in tension variation of T_1 in acceleration

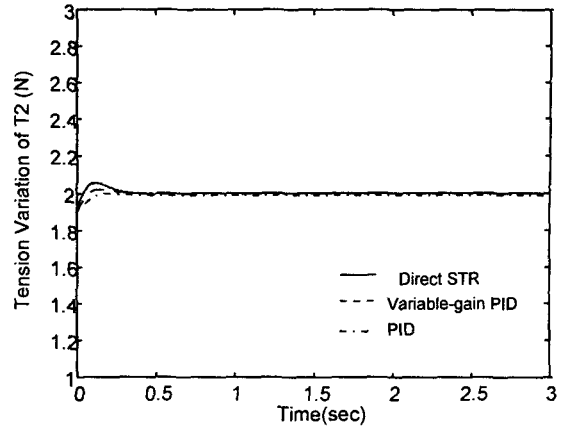


Fig.7 Comparison with each controller in tension variation of T_2 in acceleration

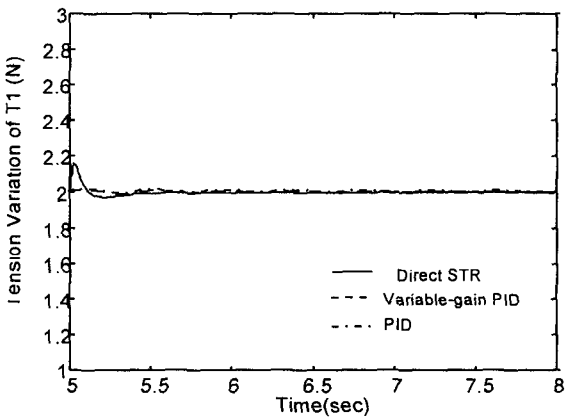


Fig.5 Comparison with each controller in tension variation of T_1 in constant velocity

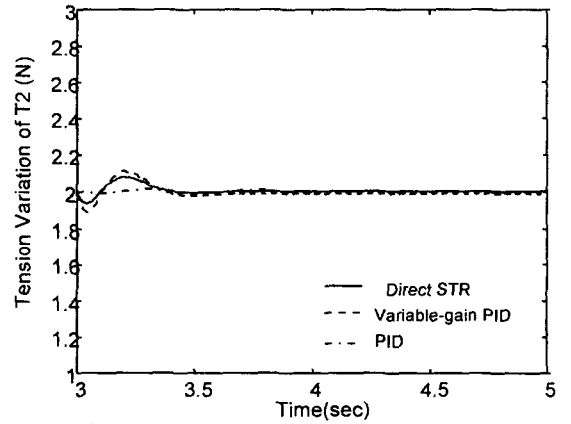


Fig.8 Comparison with each controller in tension variation of T_2 in constant velocity

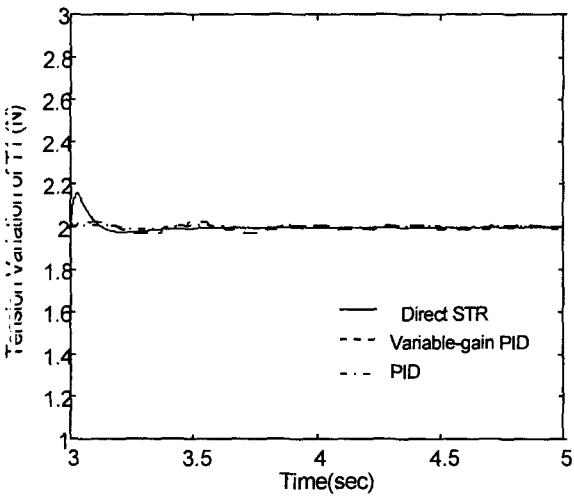


Fig.6 Comparison with each controller in tension variation of T_1 in deceleration

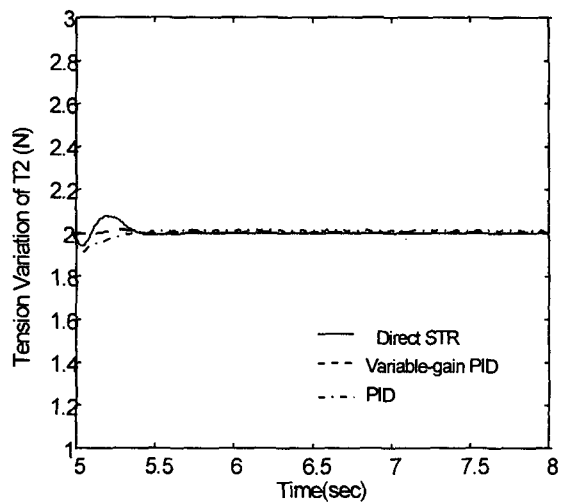


Fig.9 Comparison with each controller in tension variation of T_2 in deceleration

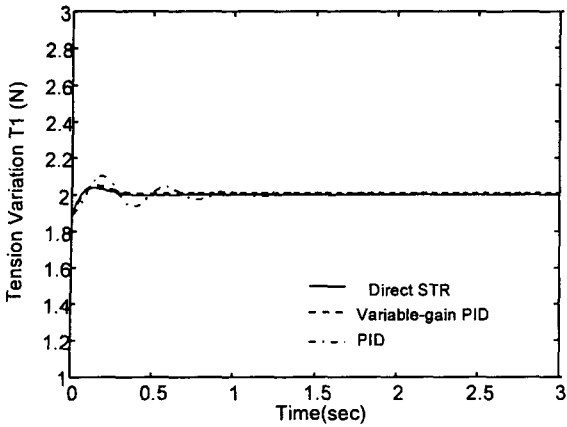


Fig.10 Comparison with each controller in tension variation of T_1 in acceleration for parameter changed

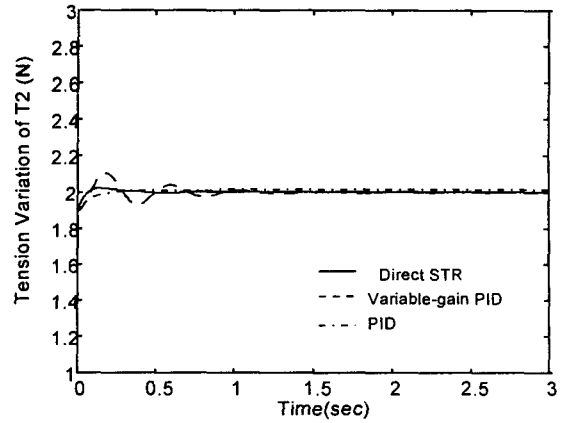


Fig.13 Comparison with each controller in tension variation of T_2 in acceleration for parameter changed

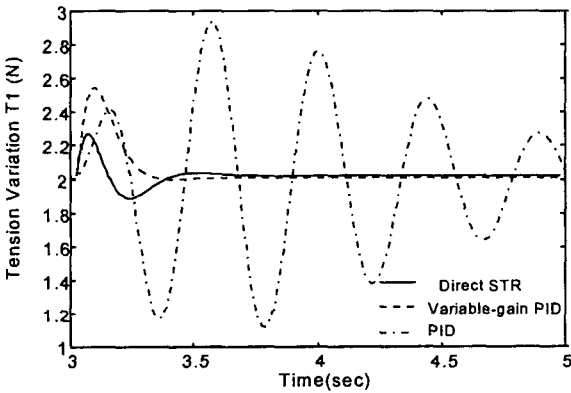


Fig.11 Comparison with each controller in tension variation of T_1 in constant velocity for parameter changed

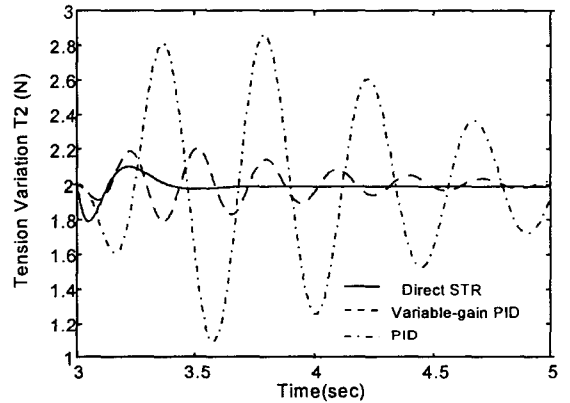


Fig.14 Comparison with each controller in tension variation of T_2 in constant velocity for parameter changed

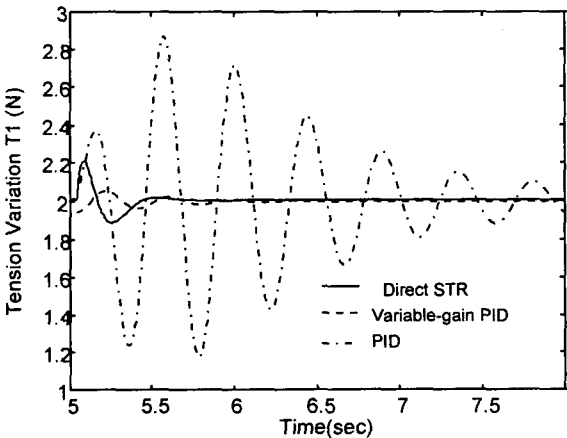


Fig.12 Comparison with each controller in tension variation of T_1 in deceleration for parameter changed

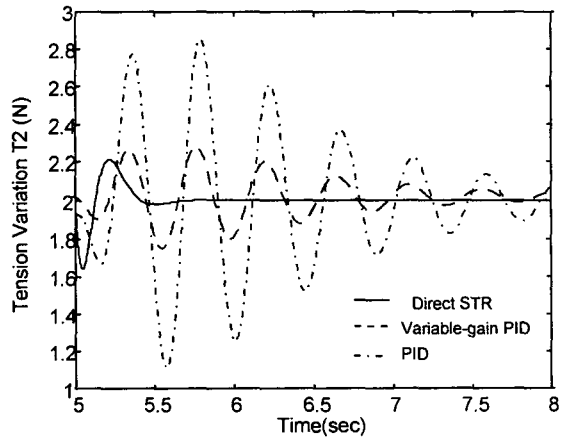


Fig.15 Comparison with each controller in tension variation of T_2 in deceleration for parameter changed