2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2000.7.17-20

시간 지연이 존재하는 분산 제어 시스템에서 Smith predictor를 이용한 제어기의 설계

조덕영*, 박익동, 허욱열
인하대학교 전기공학과

Design of Controller using Smith Predictor in the Distributed control system including time-delay.

Duk-Young Cho*, Eik-Dong Park, Uk-Youl Huh
Department of Electrical Engineering, Inha University

Abstract - This paper presents a feedback controller for compensation time delay in the distributed control systems. In using network, controllers and sensors are distributed on a communications network, there exist time delays on communication lines between the system components. So, we deal with the controller using Smith predictor controller design issue for such systems. Particularly compensated for the time delay of the plant or controller involved integrator using Modified Smith predictor. Simulation and the results show the good performance for the modified Smith predictor control systems.

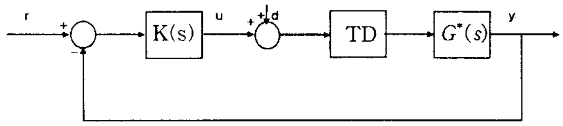
1. 서 론

디지털 컴퓨터 기술의 비약적인 발전과 네트워크의 발전으로 인하여 대용량의 시스템은 제어 요소와 제어기들, 센서 등으로 분산되어 네트워크로 연결되어 구성된 분산 제어 시스템(distributed control system)으로 많이 사용된다. 여러 개의 분산된 부시스템에서 생성되는 센서 데이터와 제어 관련 데이터들은 네트워크를 통하여 교환, 전달되고, 네트워크는 시스템을 모듈화하여 고가의 장비를 공유할 수 있고 불필요한 전선의 수를 줄인다는 장점이 있지만 여러 요소의 정보의 수집과 전달은 네트워크의 dead-time으로 인한 시간 지연을 피할 수 없게 된다. 이러한 시간지연으로 인해서 제어 시스템의 성능뿐만 아니라 안정성에도 영향을 미친다.
스미스 예측기(Smith Predictor)는 범용적이고 효과적으로 큰 dead-time을 보상할 수 있는 제어기이다. 하지만 스미스 예측기는 프로세서에 대한 수학적 모델링이 필요하여 모델의 매개 변수가 실제 시스템과 일치해야 한다. 이 말은 곧 프로세서가 이상적으로 안정하지 못하면 스미스 예측기가 PI제어 보다 못할 수 있다는 큰 단점도 있다. 그리고 시스템에 적분 요소가 존재하는 경우 부하 외란에 대한 정상 상태 오차가 발생하게 된다. 이런 단점을 해결하기 위해 Watanabe등은 적분기를 갖는 플랜트에 대한 부하 외란에 의한 특성을 개선할 방법을 제안하였다. 하지만 이 방법은 지연 시간이 큰 경우 기준 입력과 부하 외란의 응답에 큰 진동을 시스템의 응답 속도가 느려질 수 있다. Astrom와 Matausek는 부하 외란에 의한 정상 상태 오차를 완전히 제거하고 매개변수의 수를 줄인 변형된 스미스 예측기를 제안했으나 이 제안은 제안된 구조와 모델의 시스템의 표현식이 일치하지 않았다.
본 논문의 구성은 다음과 같다. 본론 2.1과 2.2에서 네트워크를 통한 분산 제어시스템에서 시간 지연에 대한 보상을 위하여 모델링을 하고, 스미스 예측기를 적용하였다. 본론 2.3에서는 적분요소를 갖는 시간 지연 시스템의 변형된 형태를 제안한다. 본론 2.4에서는 변형된 스미스 예측기는 원래의 스미스 예측기와 기준 입력에 대한 출력값에 대한 특성과 설계에 대해서 기술한다. 본론 2.5절에서는 모의 실험 시뮬레이션의 결과로 원래의 스미스 예측기와 변형된 스미스 예측기를 비교하여 변형된 스미스 제어기의 우수함을 확인한다. 마지막으로 논문의 결론을 기술한다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델

네트워크 상에서 센서 모듈과 플랜트 제어기에서 데이터 전송 시에 발생하는 시간 지연 현상은 불가피하다. 본 논문에서는 제어기와 플랜트 사이에서 관계와 발생하는 시간 지연 요소를 가상 회로(VC)로 구성하고, 플랜트에서 제어기로 피드백(feedback)시에 발생하는 시간 지연 요소 time delay(TD)를 고려한 모델을 〔그림 2-1〕과 같이 나타내었다.



〔그림 2-1〕 일반적인 시간 지연이 있는 시스템 모델

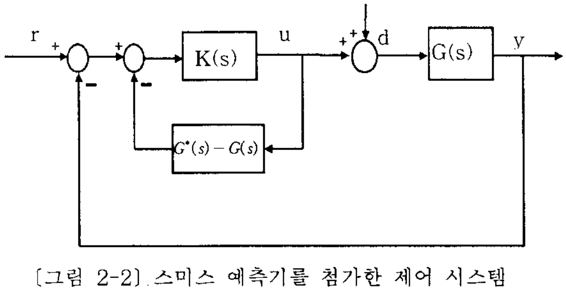
여기서 K(s)는 제어기(controller)를 나타내고 G(s)는 플랜트(plant)의 전달 함수를 나타내고, r은 기준입력(reference input)이고, 네트워크 상의 시간지연은 TD로, u는 제어입력이고, d는 외란 입력, y는 출력을 나타낸다.

2.2 스미스 예측기(Smith Predictor)

시스템의 전달 함수를 나타내는 G(s)는 지연 시간을 가지지 않는 시스템의 전달 함수 $G^*(s)$와 시간 지연 전달함수 e^{-Tds}의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$G(s) = G^*(s)e^{-Tds} \qquad (1)$$

스미스 예측기는 시간 지연 요소를 루프 밖으로 빼내고 유한한 상태 공간 표현이 가능한 $G^*(s)$만을 이용해서 되먹임 구조로 〔그림 2-2〕와 같이 나타낼 수 있다.



〔그림 2-2〕 스미스 예측기를 첨가한 제어 시스템

기준입력 r에서 출력 y에 대한 전달함수를 구하면

$$G_r(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{K(s)\,G(s)}{1 + K(s)\,G^*(s)} \qquad (2)$$

여기서 분모는 지연요소인 e^{-Tds}을 갖고 있지 않고, 피드백 시스템은 일반적인 제어기 K(s)는 지연과 상관없으므로 안정적인 시스템을 구성한다. 만약 K(s)가 적분요소를 갖고 있다면 이때의 정상 상태 오차는 step 입력일 때 영이 된다.
외란 d에 대한 출력 y의 전달함수는

$$G_d(s) = \frac{y(s)}{d(s)} = \frac{G(s)}{1 + K(s)\,G^*(s)} + \frac{K(s)\,G(s)}{1 + K(s)\,G^*(s)}\,(G^*(s) - G(s)) \qquad (3)$$

만약 플랜트 $G^*(s)$가 점근적으로 안정하고 제어기 K(s)가 적분 요소를 포함하고 있다면 그때 정상 상태 오차는 외란 입력이 step 입력일 때 제로이다. 만약 $G^*(s)$가 적분요소를 갖고 있다면 그때 정상 상태 오차는 영이 아니고 다음과 같다. P 〉 0으로 가정한다.

$$G(s) = \frac{P}{s}\,e^{-Tds} \qquad (4)$$

식 (4)의 $G^*(s)-G(s)$ 항으로부터 부등식 (5)를 구할 수 있다.

$$\lim_{s\to 0}\left(\frac{P}{s} - \frac{P}{s}\,e^{-Tds}\right) = PT_d \neq 0 \qquad (5)$$

이 식은 시스템의 제어기 K(s)가 적분 요소를 갖고 있을지라도 외란 입력이 step 입력일 때 정상상태 오차가 영이 아니라는 것을 의미한다. 식(3)으로부터 외란 step 입력에 대한 출력 y를 구하면

$$y(s) = \left[\frac{G(s)}{1 + K(s)\,G^*(s)} + \frac{K(s)G(s)}{1 + K(s)\,G^*(s)}\,(G^*(s) - G(s))\right]\frac{1}{s} \qquad (6)$$

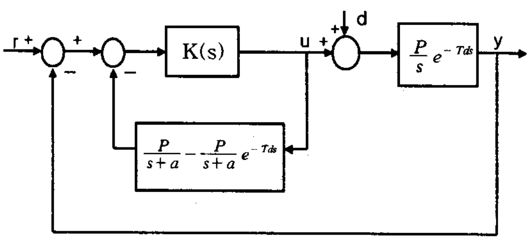
여기서 식(5)의 두 번째항 오른쪽을 전개하면

$$(G^*(s) - G(s))\,\frac{1}{s} = P\,\frac{1 - e^{-Tds}}{s^2} \qquad (7)$$

이 식은 피드백 제어 시스템이 내부적으로 불안정하다는 것이다.

2.3 적분 요소를 갖고 있는 시스템의 모델링

적분 요소를 갖고 있는 모델의 안정시키기 위해서 〔그림 2-3〕과 같이 변형시키면 (단 $a > o$)



〔그림 2-3〕 적분 요소를 갖는 스미스 예측기의 모델

여기서 적분기를 갖고 있는 시스템에 다음과 같은 형태의 보상기를 추가한다. 단 $a > 0$

$$\frac{P}{s+a} - \frac{P}{s+a}\,e^{-Tds}$$

이 모델의 기준입력에 대한 전달 함수를 구하면

$$G_r(s) = \frac{K(s)\frac{P}{s}e^{-Tds}}{1 + K(S)\frac{P}{s+a} + K(s)\left(\frac{P}{s} - \frac{P}{s+a}\right)e^{-Tds}} \qquad (8)$$

특성식으로 다시 쓰면

$$G_r(s) = \left\{1 + K(s)\frac{P}{s+a}\right\}\left\{1 + \frac{K(S)\left(\frac{P}{s} - \frac{P}{s+a}\right)e^{-Tds}}{\frac{1+K(s)P}{s+a}}\right\} \qquad (9)$$

제어기 K(s)는 식 (9)의 첫번째 항이 안정화되도록 설계되어야 한다.

$$1 + K(s)\frac{P}{s+a}$$

두 번째 항인 다음식

$$1 + \frac{K(S)\left(\frac{P}{s} - \frac{P}{s+a}\right)e^{-Tds}}{1 + \frac{K(s)P}{s+a}}$$

안정하다면, 이때의 제어 시스템은 안정하다. 이것은 벡터 plot가 복소 평면상의 점(-1,0)을 포함하지 않는다는 것이며, 제어 시스템이 안정하다는 것은 필요충분 조건이다.
외란 입력 d에 의한 전달함수를 구하면

$$G_d(s) = \frac{\frac{P}{s}e^{-Tds}}{1 + K(S)\frac{P}{s+a} + K(s)\left(\frac{P}{s} - \frac{P}{s+a}\right)e^{-Tds}} + \frac{K(s)\frac{P}{s}e^{-Tds}}{1 + K(S)\frac{P}{s+a} + K(s)\left(\frac{P}{s} - \frac{P}{s+a}\right)e^{-Tds}} \cdot \left(\frac{P}{s+a} - \frac{P}{s+a}\,e^{-Tds}\right) \qquad (10)$$

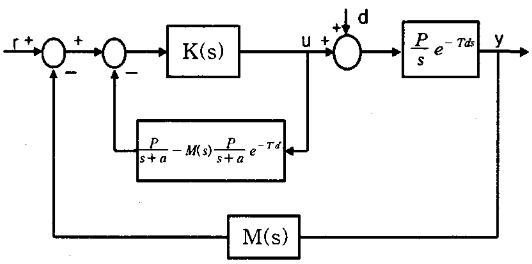
따라서

$$\lim_{s\to 0}\frac{P}{s+a} - \frac{P}{s+a}\,e^{-Tds} = 0 \qquad (11)$$

이므로 제어기 K(s)가 적분기를 갖고 있다면 정상 상태 오차가 영이다. 전달 응답은 $1/(s+a)$에 의해 결정되고, 작은 a에 대해서는 매우 작게 반응한다.

2.4 변형된 스미스 예측기

외란 입력에 대한 전달 응답을 개선하기 위해서 변형된 스미스 예측기를 제안한다. 시스템은 〔그림 2-4〕에 나타내고, M(s)는 외란에 대한 보상기를 나타낸다.



〔그림 2-4〕 새롭게 변형된 스미스 예측기

기준 입력 r에 대한 전달 함수를 구하면

$$G_r(s)=\frac{K(s)\frac{P}{s}e^{-Tds}}{1+K(S)\left\{\frac{P}{s+a}+M(s)\left(\frac{P}{s}-\frac{P}{s+a}\right)e^{-Tds}\right\}} \qquad (12)$$

분모를 다시 표현하면

$$1+K(S)\left\{\frac{P}{s+a}+M(s)\left(\frac{P}{s}-\frac{P}{s+a}\right)e^{-Tds}\right\}$$

$$=\left\{1+K(s)\frac{P}{s+a}\right\}\left\{1+\frac{M(s)P(s)\frac{P}{s+a}}{1+K(s)\frac{P}{s+a}}\frac{a}{s}e^{-Tds}\right\} \qquad (13)$$

이 시스템이 안정하기 위해서는 다음의 벡터 plot가

$$1+\frac{M(s)P(s)\frac{P}{s+a}}{1+K(s)\frac{P}{s+a}}\frac{a}{s}e^{-Tds}$$

복소 평면의 점(-1,0)을 둘러쌓지 않으면 된다.
외란 d에 대한 y의 전달 함수를 구하면

$$G_d(s)=\frac{\frac{P}{s}e^{-Tds}}{1+K(S)\frac{P}{s+a}+M(s)\left(\frac{P}{s}-\frac{P}{s+a}\right)e^{-Tds}}+\frac{K(s)\frac{P}{s}e^{Tds}}{1+K(S)\frac{P}{s+a}+M(s)\left(\frac{P}{s}-\frac{P}{s+a}\right)e^{Tds}}\cdot\left(\frac{P}{s+a}-M(s)\frac{P}{s+a}e^{Tds}\right) \qquad (14)$$

여기서 제어기 K(s)가 적분 요소를 갖고 있다면

$$\lim_{s\to 0}G_d(s)=\frac{P}{a}\{1-M(0)\} \qquad (15)$$

외란 step 입력에 대해 정상 상태 오차가 0이 되기 위한 필요충분 조건은 다음을 만족해야 한다.

$$M(0)=1 \qquad (16)$$

외란에 대한 전달 응답은 다음에 의해 결정된다.

$$\frac{P}{s+a}-M(s)\frac{P}{s+a}e^{-Tds}=(1-M(s)e^{-Tds})\frac{P}{s+a} \qquad (17)$$

전달 응답을 빠르게 하기 위해서 극점 $-a$는 $1-M(s)e^{-Tds}$이 0이 되어서 소거되어야 한다. 보상기 M(s)는 다음을 만족해야만 한다.

$$1-M(-a)e^{Tda}=0 \qquad (18)$$

여기서

$$M(s)=\frac{As+B}{s+\mu} \qquad (19)$$

$\mu>0$일 때 전달 응답을 구할 수 있고 식 (6)로부터

$$B=a \qquad (20)$$

마지막으로

$$A=\frac{\mu+(a-\mu)e^{-aTd}}{a} \qquad (21)$$

2.5 Simulation and results

플랜트 G(s)가

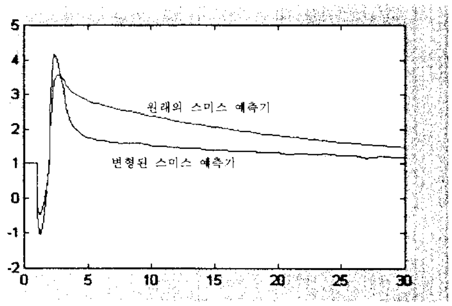
$$G(s)=\frac{1}{s}e^{-s} \qquad (22)$$

이고 제어기 K(s)가

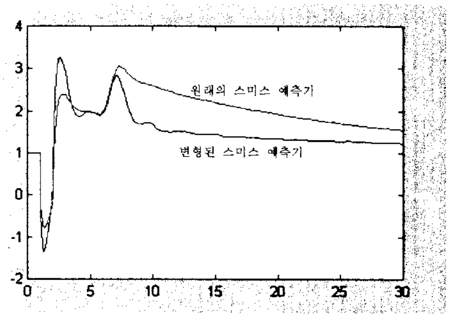
$$K(s)=\frac{5.95s+4}{s} \qquad (23)$$

일 때 $a=0.05$이라 하면, 변경된 스미스 예측기 M(s)를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$M(s)=\frac{1.927s+1}{s+1} \qquad (24)$$



〔그림 3-1〕 Step Response



〔그림 3-2〕 Response to disturbance

〔그림3-1〕은 step 응답을 보여주고 있다. 이 결과는 스미스 예측기와 변경된 스미스 예측기의 차이를 나타내어 변경된 스미스 예측기의 개선된 결과를 나타낸다. 〔그림 3-2〕는 t=5일 때 step 외란 입력에 대한 응답을 보여준다. 마찬가지로 변경된 스미스 예측기가 외란의 영향에 대해 빠른 응답을 보여준다.

3. 결 론

이 논문은 네트워크 상에서 적분기를 갖고 있는 시스템의 시간 지연의 방지를 위해 변경된 스미스 예측 제어기를 제안하였다. 시스템 내부를 안정시키기 위해서 외란에 대한 보상기를 추가하여 외란에 대한 빠른 응답과 정상 상태 오차가 영이 되도록 하여 분산 시스템의 시간 지연을 막는 것이 이 논문의 핵심이다.

[참 고 문 헌]

[1] S.Mascolo, "ATM rate-based congestion control using a Smith predictor",Performance Evalution,V.31, N1-1,1997

[2] Smith L, "Modified Smith predictor for extruded diameter control",Computer & Control Engineering, V.10 N.2,57-62, 1999

[3] K.J.Astrom.C.C.Hang and B.C.Kim "A New Smith Predictor for Controlling a Process with an integrator and long dead time" IEEE Trans. AC, Vol.39, No.2, 343-345, 1994

[4] Majhi S, Atherton DP, "Modified Smith predictor and controller for processes with time delay", IEE Proceedings, V.146 N.5, 359-366, 1999

[5] Zhang WD,Sun YX, "Two degree-of-freedom Smith predictor for processes with time delay", Automatica, V.34 N.10, 1279-1282, 1998

[6] Watanabe K., Ito M., "A Process-model control for linear system with delay", IEEE Trans. AC-26 (6) 1261-1269, 1981