시간 지연을 갖는 2차 시스템 근사를 이용한 외란 관측기 설계

정구종*, 손영익*, 정유석*
*명지대학교 전기공학과 NPTC

Design of Disturbance Observer Using a Second-Order Plus Dead Time Modeling Technique

Goo-jong Jeong*, Young-Ik Son*, Yu-seok Jeong*
*NPTC, Department of Electrical Engineering, Myoungji University

Abstract - 제어대상 시스템에 시간지연과 외란이 동시에 존재하는 경우, 스미스 예측기와 외란 관측기를 함께 사용하면 시간지연과 외란으로 인한 시스템의 성능저하를 완화할 수 있다. 하지만 시간지연이 유동적인 경우에는 설계된 스미스 예측기와 외란 관측기의 역할을 기대하기 어렵다. 본 논문은 시간지연을 갖는 2차 시스템 모델링 기법에 기반한 PID 제어기를 이용하여 시간 지연의 유동성에 대해 스미스 예측기와 외란 관측기의 강인성을 향상시키는 방법을 제안한다.

1. 서 론

시간지연이 존재하는 시스템의 안정성과 제어 성능을 향상시키기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 한편, 시간지연과 외란이 동시에 존재하는 경우 이를 보상하기 위하여 스미스 예측기와 외란 관측기를 함께 사용하는 제어 기법이 제안되었다[1]. 이는 스미스 예측기를 이용하여 시간지연으로 인한 제어성능의 저하 및 불안전성을 보상하고, 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기를 사용하여 외란의 영향을 감소시키는 방법이다[2-3].

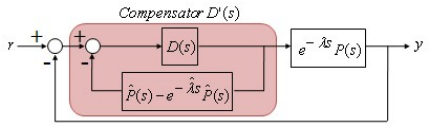
스미스 예측기 기반의 제어기는 시간지연이 존재하는 시스템의 안정성과 제어 성능을 향상시키기 위한 대표적인 제어 알고리즘이지만 불확실한 시간 지연을 갖는 경우에는 안정성을 보장하기 힘들며 안정성을 보장하기 위해서는 제어 성능의 저하를 피할 수 없다[4]. 또한, 논문 [1]에서 사용된 외란 관측기의 경우 유동적인 시간지연에 대해서는 설계시 예상했던 성능을 보장할 수 없다.

본 논문은 [1]에서 제안된 제어기의 시간지연에 대한 강인성을 향상시키기 위해 Wang 등에 의해 제안된 PID 튜닝 방법을 사용한다[5]. 이 방법은 시간지연 항을 포함한 2차 근사화 모델링 기법을 기반으로 하여 시스템의 계수 및 지연 시간 등의 불확실성에 강인한 제어기를 설계할 수 있게 한다. 논문 [1]과 [5]의 시스템에 대한 모의실험을 통해 제안된 방법의 적용 가능성을 확인한다.

2. 본 론

2.1 스미스 예측기의 구조

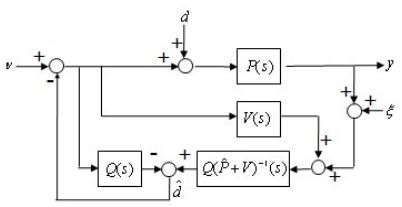
스미스 예측기는 그림 1과 같은 구조이며 제어기 $D(s)$ 설계시 시간지연 항을 무시하고 전달함수 $P(s)$만을 고려하면 되게 한다. 본 논문에서는 제어기 설계시 그림 1과 같이 실제 시스템 $e^{-\lambda s}P(s)$ 대신 시간지연을 갖는 2차 시스템으로 근사된 $e^{-\hat{\lambda}s}\hat{P}(s)$를 사용한다. 제어기 $D(s)$는 유동적인 시간지연에 강인한 PID 튜닝 방법으로 설계한다[5].



<그림 1> 스미스 예측기의 구조

2.2 비최소 위상 시스템의 외란 관측기 구조

시간지연으로 인한 비최소 위상 시스템의 외란 제거를 위해 본 논문에서는 그림 2와 같은 외란 관측기를 사용한다[3].



<그림 2> 비최소 위상 시스템의 외란 관측기

$P(s)$는 실제 시스템 전달함수이고, $\hat{P}(s)$는 2차 근사된 공칭 시스템 전달함수이다, $Q(s)$는 Q-필터. d는 외란, ξ는 측정 잡음이다. 외란 관측기는 공칭시스템의 역함수를 사용하기 때문에 $\hat{P}(s)$가 비최소 위상 시스템일 경우에는 폐루프 시스템의 불안정을 초래하기 쉽다. 본 논문에서는 $V(s)$를 설계하여 $(\hat{P}+V)(s)$를 최소 위상 시스템으로 만들어 적용한다[2]. 시간지연을 갖는 시스템은 항상 비최소 위상 시스템이 되기 때문에 위의 구조와 같은 외란관측기를 사용하였다.

일반적으로 $V(s)$는 $P(s)$를 안정화시키는 제어기의 역수를 사용하며, 추정한 외란 $\hat{d}$과 실제 외란 d의 오차를 줄이기 위해서는 외란의 주파수에서 $(\hat{P}(s)+V(s))\simeq\hat{P}(s)$ 혹은 $V(s)\simeq 0$이 되도록 설계한다. 본 논문에서는 [5]에서 제안한 PID 제어기의 역수를 사용한다.

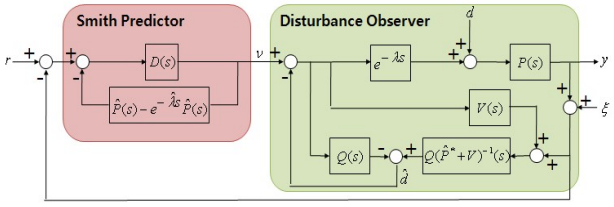
그림 2의 출력 y에 대한 식은 다음과 같다.

$$y = \frac{P(\hat{P}+V)}{(\hat{P}+V)(1-Q)+(P+V)Q}\nu + \frac{P(\hat{P}+V)(1-Q)+PVQ}{(\hat{P}+V)(1-Q)+(P+V)Q}d - \frac{PQ}{(\hat{P}+V)(1-Q)+(P+V)Q}\xi \quad (1)$$

저주파 영역에서 $Q(s)=1$이고 $|\hat{P}(s)+V(s)|\simeq|\hat{P}(s)|=0$이면, 외란에 대한 영향은 사라지고, 고주파 영역에서 $Q(s)=0$이면 잡음에 대한 영향이 사라진다. 따라서, $y\approx\hat{P}(s)\nu$임을 알 수 있다[1,3].

2.3 시간 지연 시스템에 대한 외란 관측기 적용

시간지연과 외란이 동시에 존재하는 경우에 대해 본 논문에서는 그림 3과 같은 제어기를 제안한다. 주제어기로 사용된 스미스 예측기는 시간지연으로 인한 성능 저하를 보상하고, 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기는 외란에 대한 영향을 줄일 수 있다. 이때, 제어기 $D(s)$와 외란 관측기의 $V(s)$에 따라 시간지연에 강인성을 향상시킬 수 있음을 예제를 통해 확인할 수 있다.



<그림 3> 외란 관측기 및 스미스 예측기 적용

그림 3에서 $\widehat{P^*}(s)$는 공칭 시스템 $\hat{P}(s)$에 시간 지연항의 Pade 근사식을 결합한 형태이다. 출력 y에 대한 식은 다음과 같다.

$$y=\frac{(\widehat{P^*}+V)e^{-\lambda s}P}{(\widehat{P^*}+V)-Q(\widehat{P^*}-Pe^{-\lambda s})}\nu+\frac{P(\widehat{P^*}+V)-Q\widehat{P^*}P}{(\widehat{P^*}+V)-Q(\widehat{P^*}-Pe^{-\lambda s})}d - \frac{Qe^{-\lambda s}P}{(\widehat{P^*}+V)-Q(\widehat{P^*}-Pe^{-\lambda s})}\xi \quad (2)$$

위 식에서도 앞 절과 같은 해석으로 $y\approx\widehat{P^*}(s)\nu$임을 알 수 있다.

3 설 계 예 제

본 장에서는 모의실험을 통해 제안된 방법의 성능을 시험한다. 그림 3에서 대상 시스템 $P(s)$는 아래와 같다. 0.3초의 시간지연이 발생하는 경우를 고려한다.

$$P(s)=\frac{1}{(s^2+2s+3)(s+3)},\lambda=0.3[\sec] \quad (3)$$

위 시스템은 아래와 같이 시간지연을 갖는 2차 근사 모델로 나타낼 수 있다[5].

$$\hat{P}(s)=\frac{1}{3.825s^2+6.903s+9.573},\hat{\lambda}=0.523[\sec] \quad (4)$$

논문 [5]의 방법으로 설계된 아래 제어기는 비교적 넓은 범위의 시간 지연에 대해서 $P(s)\times e^{-\lambda s}$를 안정하게 한다.(아래 그림 6 참조)

$$D(s)=3.885+\frac{5.388}{s}+2.153s \quad (5)$$

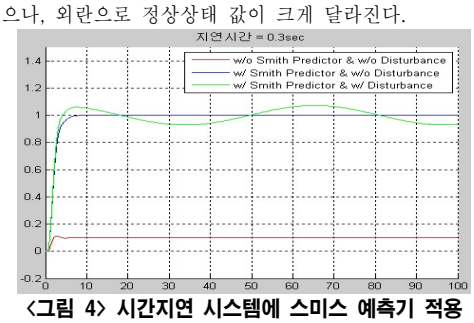
본 논문의 모의실험에 사용된 환경은 표 1과 같다.

<표 1> 모의실험 변수

Q-필터	분모(m) : 4	외란	$3\sin(0.1t)$
	분모(n) : 3	측정 잡음	$0.5\sin(200t)$
	시정수(τ) : 0.05	기준입력 값	1

3.1 시간 지연 시스템에 대한 스미스 예측기 적용

그림 4는 외란이 없을 때 스미스 예측기의 성능 개선과 외란이 존재할 때 PID 제어기 $D(s)$의 한계를 나타낸다. 시간지연으로 인한 현상은 개선되었으나, 외란으로 정상상태 값이 크게 달라진다.



<그림 4> 시간지연 시스템에 스미스 예측기 적용

3.2 시간 지연 시스템에 대한 외란 관측기 설계

외란의 영향을 감소시키기 위해 외란 관측기를 설계한다. 본 논문에서는 시간지연 요소를 Pade 1차 근사로 고려하였다. 식 (6)은 시간 지연을 포함한 공칭 시스템이다.

$$\widehat{P^*}(s)=\frac{1}{3.825s^2+6.903s+9.573}\times\frac{-s+3.824}{s+3.824} \quad (6)$$

외란 관측기의 $V(s)$는 $D(s)$의 역수이므로 식 (7)과 같다.

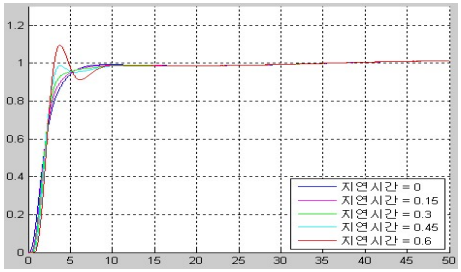
$$V(s)=\frac{s}{2.153s^2+3.885s+5.388} \quad (7)$$

그림 5는 외란이 있을 때 외란 관측기 유무에 따른 모의실험 결과이다. 스미스 예측기와 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기를 사용함으로써 시간지연 시스템의 외란 효과를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

<그림 5> 제안된 제어기를 이용한 모의 실험 결과

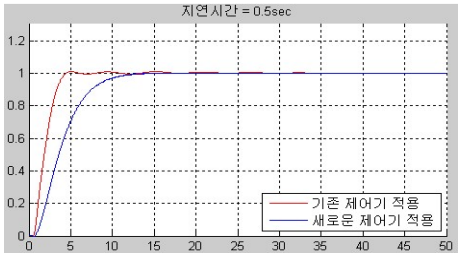
3.3 불확실한 지연시간에 대한 시스템의 성능 변화

그림 6은 지연시간의 변화에 따른 시스템의 성능 변화를 나타낸다. 정적인 지연시간 0.3초를 기준으로 설계된 제어기는 유동적인 지연시간 0초에서 약 0.6초까지의 범위에서 안정함을 보이고 있다.



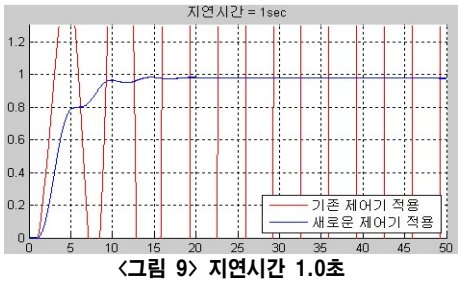
<그림 6> 지연시간의 변화에 따른 시스템의 성능 변화

아래 그림들은 논문 [1]의 예제에 대하여 본 논문의 제어기 설계방법을 적용하여 비교하였다. 설계시의 시간지연 0.5초에 대해 성능 변화를 나타낸다. 논문 [1]의 제어기에 비해 새로운 제어기가 보다 강인함을 알 수 있다.



<그림 7> 지연시간 0.5초

<그림 8> 지연시간 0초



<그림 9> 지연시간 1.0초

4. 결 론

본 논문에서는 시간지연과 외란이 존재하는 시스템에 대하여 스미스 예측기와 외란 관측기를 적용함으로써 제어성능을 향상시킬 수 있음을 보였다. 논문 [5]의 결과를 이용함으로써 제안된 제어기의 강인성을 향상시키는 방법을 제안하였다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로
한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(R11-2001-093-03005-0 (2008))
이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로
한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(KRF-2007-611-D00013)

[참 고 문 헌]

[1] 정구종, 손영익, 정유석, "시간 지연을 갖는 시스템에 대한 외란 관측기 기반 강인 제어기 설계", *2008 정보 및 제어 심포지엄 논문집*, pp. 213-214, 2008

[2] O.J.M. Smith,, "Closed control of loops with dead time". Chemical Engineering Progress, 53, May, pp. 217-219, 1957

[3] Y.I Son, H. Shim, N.H. Jo and S.J. Kim, "Design of Disturbance Observer for Non-minimum Phase Systems Using PID Controllers", Proc. of *SICE2007*, pp. 196-201, Japan, Sep. 2007.

[4] 송기원, "시간지연을 갖는 LonWorks/IP 가상 디바이스 네트워크에서 직류모터의 위치추종제어, *전자공학회 논문지*, 제43권 SC편 제 4호, pp. 210-21, 2006

[5] Q.-G. Wang, T.-H. Lee, H.-W. Fung, Q. Bi, Y. Zhang, "PID Tuning for Improved Performance", *IEEE Trans. Contr. Sys. Tech.*, Vol. 7 No. 4, pp. 457-465, 1999