

하중함수의 오토 투닝에 의한 강인한 H^∞ 속도제어기의 구현

° 김동완*, 남정락*, 황기현**, 신동률***, 변기식****
 동명대학 전기전자계열*, 부산대학교 전기공학과**, 동아대학교 전기공학과***, 부경대학교 제어계측공학과****

Implementation of the robust H^∞ speed controller by auto-tuning of the weighting function

° Dong-Wan Kim*, Jing-Lak Nam*, Gi-Hyun Hwang**, Dong-Ryul Shin***, Gi-Sig Byun****
 Dept. of Electricity, Tongmyong College, 505, Yong-Dang Dong, Nam-Ku, Pusan, Korea

Abstract - In this paper, we are applied the Genetic Algorithm(GA) to design of the robust H^∞ speed controller by auto-tuning of the weighting function. GA is used to design of the weighting functions in the robust H^∞ controller.

To evaluate the performances of the proposed robust H^∞ controller, we make an experiment on H^∞ speed controller of an actual DC servo-motor system with nonlinear characteristics.

Experimental results show that proposed controller have better performance than those of PD controller.

고 프로그램화하였으며 신호처리를 위한 H/W를 개발하여 제품의 성능의 향상 및 에너지의 절약이 가능하도록 하였다.

본 연구에서의 방법은 기존의 최적화방법을 개선하고 여기에 첨단지능기법인 유전알고리즘을 적용함으로써 기존의 H^∞ 제어기의 설계시에 시행착오방법에 의존하는 설계파라미터인 하중함수의 결정을 유전알고리즘을 이용하여 실시간에서 자동 투닝하여 최적의 값을 결정함으로서 설계의 과정이 간편해지고 최적화 및 성능향상이 가능하며 CNC선반, 압연기, 산업용 정밀로봇 등의 구동 및 초정밀제어가 가능하여 생산품의 질의 향상과 수명의 연장, 고속처리 및 효율향상으로 인한 안정성과 에너지의 절약효과가 기대된다.

1. 서 론

현재 CNC선반, 정밀 로봇시스템, 펌프와 압연기 등의 산업설비와 인텔리전트 빌딩에서의 구동모터는 주로 직류서보모터를 사용하고 있다. 직류 서보모터는 교류 모터에 비해 제어가 용이한 장점 때문에 자동화설비의 서보시스템에 널리 사용되고 있다.

산업현장에서 주로 사용되고 있는 직류서보모터의 제어방법으로는 PLC 제어 또는 PID 제어 등을 주로 사용하고 있으나 이러한 제어방법은 시스템의 노후화나 내부의 전기적신호 또는 외부의 잡음의 존재, 마찰과 부하의 비선형 특성을 고려한 실질적인 시스템에 대하여는 외부신호 및 비선형 특성에 민감하여 시스템의 오동작 및 정상적인 정밀제어를 할 수 없는 결점이 있다.

시스템의 오동작은 제품의 질의 저하 또는 시스템의 정밀도에 중요한 악영향을 일으킨다. 따라서 이러한 내부의 전기적신호나 외부의 잡음에 대하여 강인한 성능을 가지는 초정밀 강인 모터제어시스템의 개발은 제품의 질의 향상과 전력에너지의 절약측면에서 중요하다.

이를 위해 국내외에서 LQ방법, LQG/LTR제어방법을 사용한 시스템의 개발이 진행되고 있으나 외부의 잡음제거효과는 있으나 내부의 시스템요소의 노후화나 내부의 전기적신호에 대한 강인 성능을 체계적으로 가지지 못하는 결점이 있다. 또한 최근에는 H^∞ 제어, 퍼지제어, 신경회로망 제어방법[1, 2, 3]을 도입함으로서 종래의 제어방법보다 제어성능을 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다.

그러나 이러한 방법은 전문가의 경험과 시행착오적인 방법에 의해 설계하는 결점이 있고 실제의 산업현장에서는 서로의 장단점을 적절히 고려해야 할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 결점을 보완하여 내부의 요소변화와 전기적신호 및 외부의 잡음에 대하여 강인한 성능을 가지고 동시에 초정밀성을 가지는 제어시스템을 구축하고자 한다. 이를 위한 제어방법으로 기존의 PID 및 LQG/LTR 등의 제어방법이 가지는 결점을 보완한 유전 알고리즘에 의한 PD제어방법, 유전알고리즘에 의한 퍼지제어방법, 유전알고리즘에 의한 H^∞ 최적화방법을 개발하

2. 제어기의 설계

본 연구에서는 모터변수의 변화와 외부의 잡음에 대하여 강인한 성능과 초정밀성을 가지는 제어시스템을 구축한다. 이를 위해 1) DC Servo Motor에 대한 모델링 2) 시스템의 구성 및 설계법 개발 3) 제어기의 알고리즘의 프로그램화 4) 구동시스템 및 신호처리를 위한 H/W와 S/W의 구축 5) 초정밀 모터제어기의 성능 검토를 시행한다.

이를 위한 설계방법은 첨단 최적화기법인 H^∞ 방법과 지능제어기법인 유전알고리즘을 조합하여 프로그램화하고, 이를 위한 H/W를 제작하여 외부의 잡음 및 전기적신호의 영향에 강인한 성능을 가지며 안정성과 효율향상으로 인한 에너지절감이 가능한 초정밀 강인 모터제어기를 완성한다.

2.1.1 유전알고리즘

진화연산은 자연 생태계의 진화 메커니즘을 모의한 확률적 탐색알고리즘으로 현재 유전알고리즘, 진화전략, 진화프로그래밍, 유전프로그래밍, 문화알고리즘 등의 연구분야가 있다[5, 6]. 이를 알고리즘들의 유사점은 주어진 최적화 문제를 하나의 해가 아닌 해집단으로 최적해를 탐색하며, 각 해를 랜덤하게 변화시키고 해들의 적합도를 결정한 후 더 좋은 적합도를 가지는 해들을 이용하여 새로운 해집단을 생성한다는 점이다.

유전알고리즘의 가장 단순한 형태인 SGA(simple genetic algorithm)를 이용하여 최적해를 구하는 과정은 다음과 같으며, 그림 1에 SGA의 흐름도를 나타내었다.

본 논문에서는 진화연산의 종류 중에서 해의 다양성과 수렴속도면에서 좋은 탐색 성능을 나타내는 유전알고리즘을 이용하였다.

a) 부호화(coding) 및 초기화(initializing) : 주어진 문제의 제약조건을 고려하여 랜덤하게 N개의 해, 즉 스트링

을 생성하는 과정으로 2진 코드 또는 실수형을 이용하여 초기해집단을 생성한다.

- b) 평가(evaluation) : 각 스트링을 디코딩(decoding)하여 주어진 목적함수에 따라 적합도를 계산한다.
- c) 복제(reproduction) : roulette wheel 방법을 사용
- d) 교배(crossover) 및 돌연변이(mutation) : 복제한 후 스트링을 변화시켜 새로운 해집단을 생성하는 과정이며 보통 교차 발생률은 0.6~0.95, 돌연변이 발생률은 0.001~0.01 범위로 설정한다.
- e) b)~d) 과정을 반복하여 수행하고 세대수 혹은 수렴 기준을 만족할 경우 종료한다.

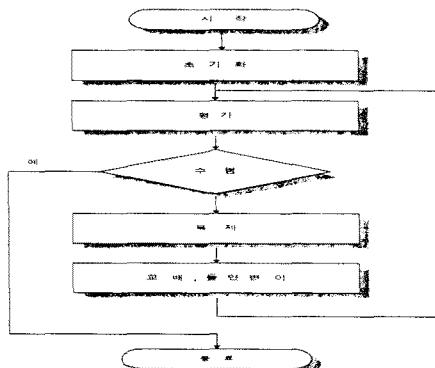


그림 1. SGA의 흐름도

2.1.2 퍼지제어기

일반적으로 퍼지제어기는 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로는 해석할 수 없거나, 얻어지는 정보가 정성적이고, 불확실한 경우에 우수한 제어성을 나타낸다. 또한 기존의 수학적 모델링을 기초로 한 제어기와는 달리 시스템의 입·출력 관계만으로도 제어기를 설계할 수 있다. 비퍼지화는 퍼지값인 퍼지추론 결과 값을 명확한 값의 제어조작량으로 변환시켜주는 과정으로 본 논문에서는 무게중심법을 사용하였다.

본 논문에서는 확률적인 최적화 알고리즘인 유전알고리즘을 이용하여 퍼지제어기의 소속함수 모양과 입·출력 이득을 동조하였다.

그림 2는 본 논문에서 사용한 삼각형 소속함수를 나타내었으며, 퍼지제어기의 입·출력변수에 각각 7개의 퍼지 변수를 사용하였으므로, 전체 소속함수는 21개로, 모든 소속함수의 꼭지점과 폭을 동조하려면 63개의 변수가 필요하다. 그러나 63개의 변수를 적용진화알고리즘을 이용하여 동조하려면 탐색시간이 많이 걸릴 뿐만 아니라, 수렴특성이 나쁘고, 컴퓨터 메모리 면에서도 많은 부담이 생긴다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 제로(ZO) 소속함수의 모든 꼭지점을 영점에 고정시켰고, 각 소속함수의 폭은 모두 대칭으로 두었으며, 영점을 기준축으로 하여 모든 소속함수들을 대칭으로 구성하였다. 따라서 퍼지제어기 입·출력변수의 소속함수를 동조하는데 필요한 적용진화알고리즘의 스트링은 그림 3과 같이 삼각형 소속함수의 꼭지점이 세 개씩 필요하며, 폭이 네 개씩 필요함으로 21개의 변수와 입·출력 이득을 포함해서 총 24개로 스트링을 구성하였다.

그리고 해집단의 각 스트링을 평가하기 위하여 사용된 적합도 함수는 식 (1)과 같이 전동기 각속도의 절대치편차의 합을 사용하였다.

$$\text{fitness} = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^K |\omega_c - \omega_k|} \quad (1)$$

여기서, ω_k : 실제 속도[rpm]

ω_c : 기준 속도[rpm]

N : T시간 동안 획득한 데이터의 개수

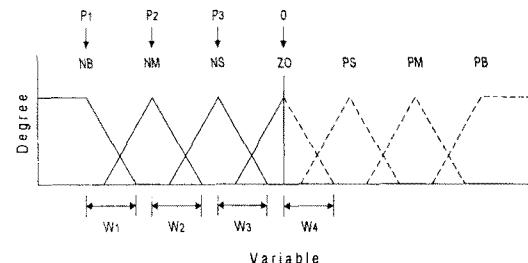


그림 2 대칭형 삼각형 소속함수

S_1	$P_{1,1}$	\dots	$P_{1,9}$	$W_{1,1}$	\dots	$W_{1,12}$	$SF_{1,1}$	\dots	$SF_{1,3}$
S_n	$P_{n,1}$	\dots	$P_{n,9}$	$W_{n,1}$	\dots	$W_{n,16}$	$SF_{n,1}$	\dots	$SF_{n,3}$

여기서, P_{ij} : 소속함수의 꼭지점

W_{ij} : 소속함수의 밑변길이의 1/2

SF_{ij} : 입·출력 이득

n : 스트링 개수

그림 3 해집단의 구조

2.1.3 하증함수의 오토튜닝에 의한 H^∞ 제어기의 설계

H^∞ 제어기론은 주어진 가격함수의 ∞ -노음을 최소화하여 모델링 오차에 대한 시스템의 안정성을 보장하며 만족스러운 명령 추종성능을 가지는 강인한 제어기를 설계하는 것이다.

여기서, 플랜트 및 구동기 등으로 이루어진 일반화 플랜트 $P(s)$ 에 대해 외부입력과 오차신호를 각각 $w(s)$, $z(s)$ 로 정의하고 제어기 $K(s)$ 를 사용하여 $w(s)$ 와 $z(s)$ 사이의 전달함수를 구하면 다음과 같은 선형분수변환(linear fractional transformation) $F_l(P, K)$ 를 얻을 수 있다.

$$z(s) = F_l(P, K)w(s) = [P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21}]w(s) \quad (2)$$

단, $P_{11}(s) : p_1 \times m_1$, $P_{12}(s) : p_1 \times m_2$,

$P_{21}(s) : p_2 \times m_1$, $P_{22}(s) : p_2 \times m_2$

따라서 H^∞ 제어문제는 일반화 플랜트 $P(s)$ 와 제어기 $K(s)$ 로 이루어진 전체 페루프 시스템을 안정하게 하고 외부입력과 오차신호사이의 전달함수인 선형 분수변환식 $F_l(P, K)$ 의 H^∞ -노음을 최소화하는 제어기 $K(s)$ 를 찾는 문제가 된다. 즉 H^∞ 제어문제는 식(3)와 같다.

$$\text{minimize} \| F_l(P, K) \|_\infty \quad (3)$$

여기서, $F_l(P, K) \in RH_\infty$

단, RH_∞ 는 실계수를 가지고 상태공간모델로 나타낼 수 있는 안정한 전달함수들의 집합을 의미한다. 일반적으로 ∞ -노음을 정확히 계산할 수 없으므로 다음과 같이 적절한 상한치 γ

() 0)를 주고 안정한 제어기 $K(s)$ 를 찾는다.

$$\| F(P, K) \|_{\infty} < \gamma \quad (4)$$

유전 알고리즘을 사용하여 가중치 함수와 설계 파라미터 γ 를 동시에 최적화한다. 설계 파라미터인 가중치 함수에 다음 식들과 같이 개인 파라미터 (g_{w1i} , g_{w2i})를 변수로 주고 γ 와 함께 동시에 최적화한다.

식 (5)과 (6)에서 g_{w1i} , $i = 1, 2, 3$ 은 각각 $w_{1i}(s)$ 의 개인 파라미터를 나타낸다.

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & 0 & 0 \\ 0 & w_{12}(s) & 0 \\ 0 & 0 & w_{13}(s) \end{bmatrix} = \frac{g_{w1i} \times (s + 5)}{s^2 + (0.0001 + 0.05)s + (0.0001 \times 0.05)} \times I_3 \quad (5)$$

$$W_2(s) = \frac{g_{w2} \times (s + 10)}{s + 1000} \times I_3 \quad (6)$$

3. 실험 결과

직류 서보 모터의 속도제어를 위한 실제 구성을 그림 4와 같고 직류 서보모터의 정격은 75[v], 3.3[A], 3000[rpm]이며 전원부, 신호처리부, 제어부로 구성하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 전체 속도제어시스템은 전류루프와 속도루프로 구성되어 있으며, 속도루프의 샘플링 시간은 4[msec] 이다.

그림5는 실제 직류 서보 모터의 속도제어를 위한 구동 회로이며 그림 6은 실제 실험장치이다.

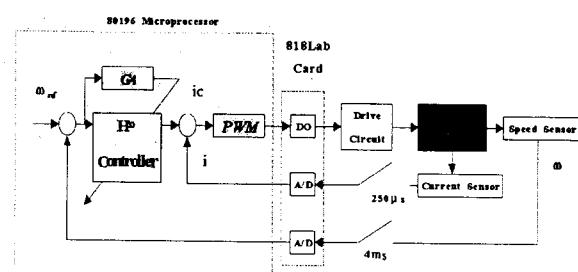


그림 4 강인한 속도제어 시스템의 구성도

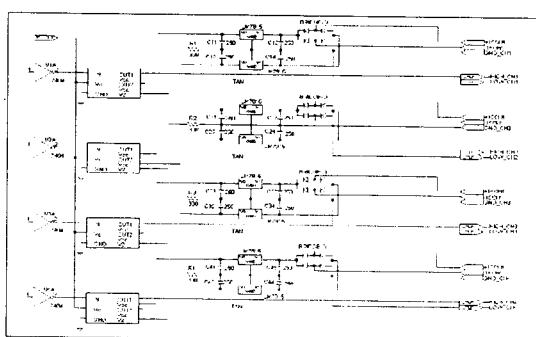


그림 5. DC SERVO MOTOR의 구동 회로도

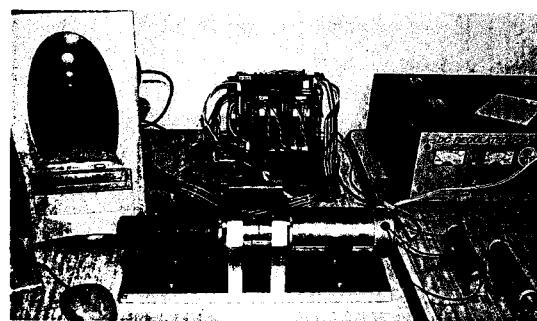
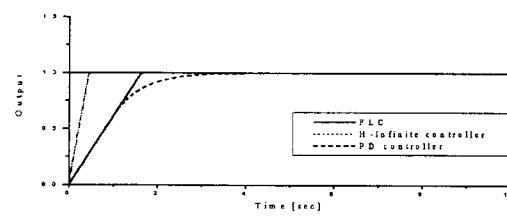
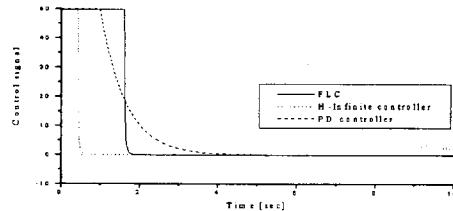


그림 6. 강인한 H^{∞} 속도제어기의 실험 장치

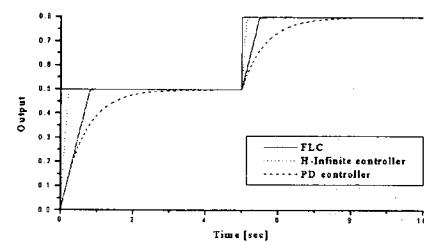


(a) 속도 응답

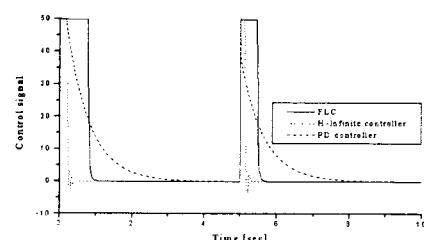


(b) 제어 입력

그림 7. 기준신호에 대한 퍼지제어기, H^{∞} 제어기 및 PD제어기의 속도응답

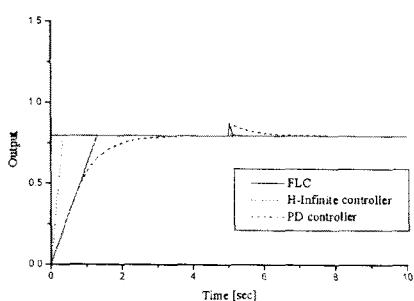


(a) 속도 응답

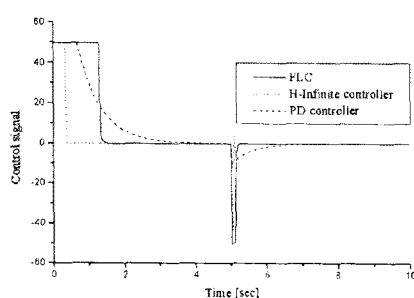


(b) 제어 입력

그림 8. 미지신호에 대한 퍼지제어기, H^{∞} 제어기 및 PD제어기의 속도응답



(a) 속도 응답



(b) 제어 입력

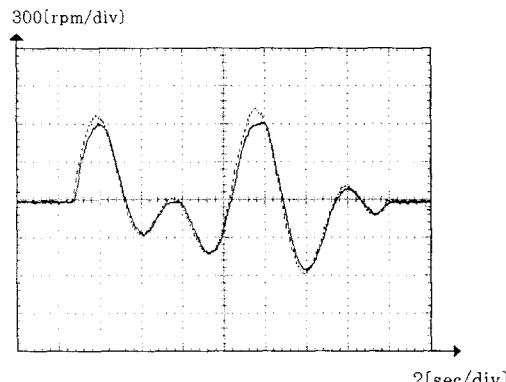
그림 9. 퍼지제어기, H^∞ 제어기 및 PD제어기의 속도응답

그림 7은 유전알고리즘을 이용하여 퍼지제어기의 소속 함수 모양 및 출력력 이득 동조에 사용된 기준속도에 대한 PD 제어기, H^∞ 제어기 및 퍼지제어기의 실제속도 응답 특성을 보였다.

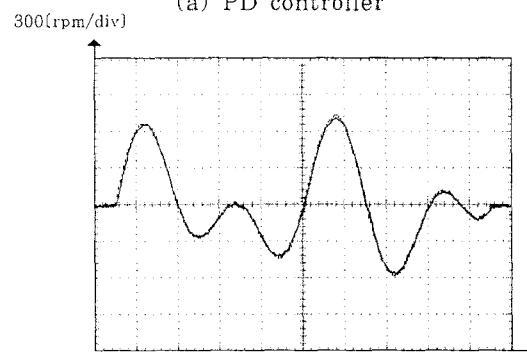
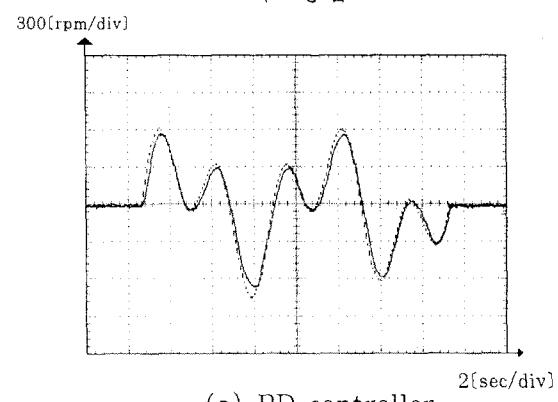
그림 7에서 PD 제어기의 정정시간은 약 2.5[sec]이고, 퍼지제어기의 정정시간은 약 1.2[sec], H^∞ 제어기의 정정시간이 0.5[sec]로 H^∞ 제어기와 퍼지제어기가 PD 제어기보다 약 2.0[sec] 정도 더 빨리 정상상태에 도달하며 H^∞ 제어기의 특성이 가장 뛰어남을 알 수 있다. 그리고 H^∞ 제어기와 퍼지제어기의 오버슈트는 약 1[%] 정도이며 H^∞ 제어기는 약간 진동이 존재함을 알 수 있다. 따라서, 퍼지제어기와 H^∞ 제어기가 정정시간 및 오버슈트면에서 PD제어기보다 더 나은 제어 성능을 보임을 알 수 있다.

그림 8은 5[sec]후에 시스템의 동조에 사용되지 않은 새로운 기준입력에 대한 PD 제어기, H^∞ 제어기 및 퍼지제어기의 실제속도 응답을 보였다. 그림 11에서 PD 제어기의 정정시간은 약 2.5[sec]이고, H^∞ 제어기와 퍼지제어기의 정정시간은 약 0.5[sec]로 H^∞ 제어기가 PD 및 퍼지제어기 보다 정정시간면에서 약 0.2~2.0 [sec]정도 더 빨리 정상상태에 도달함을 알 수 있다.

그림 9는 5[sec]후에 시스템의 파라미터가 20(%)정도의 변동이 발생했을 때의 PD 제어기, H^∞ 제어기 및 퍼지제어기의 실제속도 응답, 제어입력을 보였다. 그림 11에서 시스템 파라미터 변동이 존재할 때에도 PD 제어기, H^∞ 제어기 및 퍼지제어기는 강인한 제어성능을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 시스템의 파라미터가 변한 시점에서 H^∞ 제어기와 퍼지제어기가 PD제어기보다 더 빨리 정상상태에 도달하였고, 최대 언더슈트 면에서는 H^∞ 제어기가 퍼지제어기보다 더 작은 언더슈트를 가짐을 알 수 있다.



(a) PD controller

(b) The robust H^∞ controller그림 10. H^∞ 제어기 및 PD제어기의 실제 속도응답

(a) PD controller

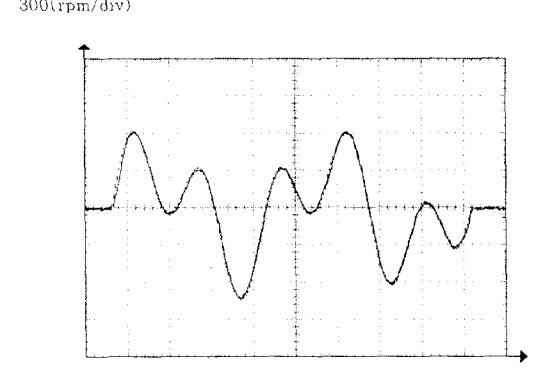
(b) The robust H^∞ controller그림 11. H^∞ 제어기 및 PD제어기의 실제 속도응답(강인성의 검증)

그림 9는 실제 실험장치에서 실시간으로 오토 투닝후의 PD제어기와 제기된 H^∞ 제어기에 대한 속도응답 특성을 비교한 그림이다. H^∞ 제어기의 성능이 뛰어나며 비선형 기준응답에 대한 특성이 우수함을 알 수 있다.

그림 10은 실제 실험장치에서 실시간으로 투닝 후 PD 제어기와 H^∞ 제어기의 강인성특성을 비교한 그림이다. 강인성의 특성을 검증하기위해 투닝시에 사용되지 않은 새로운 기준입력에 대한 성능을 평가하였으며 H^∞ 제어기가 우수함을 알 수 있다. 따라서 제기된 방법은 H^∞ 제어기의 설계를 오토 투닝으로 설계함으로서 H^∞ 제어기의 설계과정이 간단하고 또한 강인성과 안정성이 우수함을 알 수 있다.

3. 결 론

현재 산업용 설비의 대다수 및 펌프와 압연기, 인텔리전트 빌딩 등에서 사용되고 있는 구동모터의 제어는 PLC 제어 또는 PID제어방법을 사용하고 있으나 이러한 제어방법은 시스템의 노후화나 외부의 잡음 및 내부의 전기적 신호 또는 외부의 전자파의 영향에 민감하여 시스템의 오동작을 일으켜 제품의 질의 저하 또는 시스템의 정밀도에 중요한 악영향을 일으킨다.

따라서 이러한 내부의 전기적신호나 외부의 잡음에 대하여 강인한 성능을 가지는 초정밀 강인 모터제어시스템의 개발은 제품의 질의 향상과 전력에너지의 절약측면에서 중요하다. 이를 위해 국내외에서 LQ방법, LQG/LTR 제어방법 등을 사용한 시스템의 개발이 진행되고 있으나 외부의 잡음제거효과는 있으나 내부의 시스템요소의 노후화나 내부의 전기적신호에 대한 강인 성능을 체계적으로 가지지 못하는 결점이 있다.

본 연구에서는 이러한 결점을 보완하여 내부의 요소변화와 전기적신호 및 외부의 잡음에 대하여 강인한 성능을 가지고 동시에 정밀성을 가지는 정밀 강인 모터 제어시스템을 구축하고자 하였다.

이를 위한 설계방법으로 첨단 최적화기법인 H^∞ 방법과 지능제어기법인 퍼지제어기법 및 유전알고리즘을 조합하여 정밀제어기법을 개발하여 프로그램화하였으며, 이를 위한 기본적인 H/W인 정전압 전력부 및 신호처리 및 변환을 위한 제어드라이버를 제작하여 초정밀 강인 모터 제어시스템을 구성하였으며, 외부의 잡음 및 전기적 신호의 영향에 강인한 성능을 가지고 안정성과 효율향상으로 인한 에너지절감이 가능한 정밀 강인 모터제어시스템을 구축하였다. 개발된 제어시스템을 산업설비에 적용할 시에 다음의 효과가 있으리라 사료된다.

첫째 : 서보 모터의 정밀제어를 위하여 첨단지능기법인 유전알고리즘과 퍼지제어기법, H^∞ 제어기법을 적용하는 설계방법을 제공함으로써 자동화 설비 및 정밀기기에 대한 정밀제어관련 국가기반기술의 개발에 기여할 것으로 사료된다.

둘째 : CNC선반, 압연기, 산업용 정밀로봇 등의 구동 및 초정밀제어가 가능하여 생산품의 질의 향상과 수명의 연장, 고속처리 및 효율향상으로 인한 안정성과 에너지의 절약효과가 기대된다.

셋째 : 개발된 초정밀 강인 모터제어기의 H/W와 S/W의 기술을 이용하여 IBS의 자동화시스템, 정밀 산업 제조기기의 실험 모듈, 지능제어기법(퍼지 및 신경회로망기법 등)의 비교 검토, S/W 및 H/W의 compact화, 산업현장의 적용 등으로 안정성, 정밀성, 에너지절약, 고효율 등이 달성되도록 계속적인 연구가 필요하리라 사료된다.

참고문헌

- [1] Li-Xin Wang,"Stable Adaptive Fuzzy Controllers with Application to Inverted Pendulum Tracking". IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics-Part B : Cybernetics, Vol. 26, No. 5, pp.677-691, Oct. 1996
- [2] Abraham Kandel, Gideon Langholz,"Fuzzy Control Systems", CRC Press, 1994Y.
- [3] S. Kung and C. M.Liaw,"A Fuzzy Controller Improving a Linear Model Following Controller for Motor Drives", IEEE Trans. On Fuzzy Systems, Vol. 2, No. 3, pp. 194-201, Aug., 1994
- [4] C. D. Yang, H. S. Ju, S. W. Liu, " Experimental Design of H_∞ Weighting Functions for Flight Control Systems", Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 17, No. 3, pp. 544-552, May-June, 1994.
- [5] D. W. Kim, H. J. Hwang, J. H. Park, C. S. Hwang, "A Design on Model Following H_∞ Control System for Optimal Fuel-Injection of Diesel Engine Using Genetic Algorithms ", Trans. KIEE, Vol. 46, No. 7, pp. 1095-1101, July, 1997.
- [6] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley publishing Company, INC., 1989
- [7] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structures=Evolution Programs, Springer-Verlag, 1994
- [8] Mitsuo Gen and R. Cheng, Genetic Algorithms & Engineering Design, A Wiley-Interscience Publication, 1997
- [9] W. M. Spears, Evolutionary Programming IV, The MIT Press, 1995
- [10] Robert Hinterding, "Gaussian Mutation and Self-adaption for Numeric Genetic Algorithms", IEEE International Conf. on Evolutionary Computation, 1995
- [11] M. A Abido and Y. L Abdel-Magid, "Tuning of a Fuzzy Logic Power System Stabilizer Using Genetic Algorithms," IEEE, ISAP, 1997