

퍼지 제어 기법을 이용한 아라고 원판 시스템의 위치 제어에 관한 연구

문 상익*, 조 용석**, 박 기현***
*원자력 연구소, **건양 대학교, ***성균관 대학교

The Position of an Arago Disk System using Fuzzy Logic Control Technique

Sangik Mun*, Yongseok Cho**, Kiheon Park***
*Atomic Energy Research, **Kon-Yang Univ, ***Sung-Kyun-Kwan Univ

Abstract - In this paper, Fuzzy Logic Controller was Designed for the Degree control of Arago's disk system. Arago's disk system is an application of Arago's disk phenomenon which is the operating principle of induction motor. Since the Arago's disk system varies to stable region, marginally stable region, unstable region according to the degree of bar respectively, it is a suitable system which can be evaluate an efficiency of the system. While an existing controller which was designed using linearized system modeling could control the system on only one operating point, fuzzy logic controller has the advantage in showing good response for multi-operating points because it does not need system modeling.

전체 시스템은 직류 전동기를 포함한 원판의 회전 부분(직류 전동기부 모델)과 이 원판의 회전에 의한 자속의 변화로 생기는 힘에 의해 나타나는 각도의 변화 부분(아라고 원판부 모델)으로 크게 나눌 수 있고 전체 시스템의 모델링은 이들 두 부분을 각각 따로 모델링한 후 최종적으로 이들 두 부분을 결합함으로써 구할 수 있다. 상태 방정식을 구하기 위해, 각 상태 방정식을 다음과 같이 설정하고,

$$\begin{aligned} x_1 &= \alpha & x_2 &= \dot{\alpha} & x_3 &= \dot{\theta}_m = \omega \\ x_4 &= i_a & u &= V_a \end{aligned}$$

이 설정된 상태들에 대한 전체 시스템의 상태 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \tag{1.a}$$

$$\dot{x}_2 = k_1 \sin x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 \tag{1.b}$$

$$\dot{x}_3 = k_4 x_3 + k_5 x_4 \tag{1.c}$$

$$\dot{x}_4 = k_6 x_3 + k_5 x_4 + k_8 u \tag{1.d}$$

여기서

$$k_1 = -\frac{Mg}{J_a} \left(1 + \frac{I_T - I_1}{2}\right) \quad k_2 = -\frac{b_a}{J_a}$$

$$k_3 = \frac{k I_T}{J_a} \quad k_4 = -\frac{b_m}{J_m} \quad k_5 = \frac{K_T}{J_m}$$

$$k_6 = -\frac{K_E}{L_a} \quad k_7 = -\frac{R_a}{L_a} \quad k_8 = \frac{1}{L_a}$$

1. 서 론
제어 이론의 실제 적용 성능은 임의의 제어 대상을 도입하여 평가한다. 일반적으로 제어 대상으로는 직류 전동기의 속도, 위치 제어 등을 기본으로 하는 여러 가지 시스템들을 많이 사용하는데 본 논문에서는 제어 대상으로 아라고 원판 시스템(Arago's Disk System)을 선정하여, 퍼지 제어기를 이용하여 실험하고자 한다. 그 설계 결과에 따라 모의 실험을 통하여 결과를 예측하며, 또한 실제 시스템에 직접 적용해 보고 이론적인 결과와 실제 시스템에 적용했을 경우 그 결과를 비교, 분석함으로써 제어 이론의 유용성을 검증해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 아라고 원판 시스템

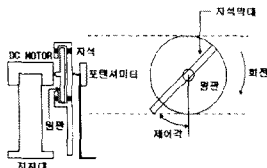


그림 1. 전체 시스템

그림 1은 실제 제작되어 있는 아라고 원판 시스템을 간략하게 나타낸 것이다.

이 시스템은 직류 전동기를 이용하여 원판을 회전시킴으로써 이에 따른 자속의 변화를 일으키는데 이 자속의 변화는 자석 막대에 일정 정도의 힘을 가하게 되고, 이 힘으로부터 생기는 자석 막대의 회전 토크를 추의 무게로 지지시켜 일정 제어 각을 유지하게 한다. 제어 각은 포텐쇼미터에 의해 측정되며 이 측정된 값을 통해 효과적으로 시스템을 제어할 수 있는 제어기를 설계함으로써 최종적으로 전체 제어 시스템을 완성하게 된다.

와 같은 비선형 상태방정식으로 나타난다.

2.2 퍼지 제어기의 설계

본 논문에서는 임계 안정 영역인 90° 와 불안정한 영역인 120° 에서 막대의 각도를 제어함으로써 제어기의 성능을 평가해 보고자 한다. 또한 기존의 논문에서 많이 사용해왔던 Look-up table 을 사용하지 않고 MATLAB에서 구현한 퍼지 제어기를 TMS320C3x를 이용하여 직접 시스템에 적용하였다.

2.1.1. 퍼지화(fuzzifier)

제어기의 입력 변수는 오차 (e)와 오차의 변화량(ce)으로 선정하고, 출력 변수는 제어기 출력 전압(cu)로 선정하였으며 아래와 같이 정의한다.

$$e(k) = r(k) - y(k) \tag{2}$$

$$ce(k) = e(k) - e(k-1) \tag{3}$$

여기서 r(k) 와 y(k) 는 각각 k번째 샘플링 시간의 기준 입력(원하는 각도)과 시스템의 출력(막대의 각도)이

다. 입력력 변수 e, ce, cu 에 대한 멤버십 함수 (membership function)은 다음과 같이 7개의 멤버십 함수로 정의했다.

nb : Negative Big nm : Negative Medium
 ns : Negative Small zo : Zero
 ps : Positive Small pm : Positive Medium
 pb : Positive Big

본 논문에서는 추가 일정한 각도를 유지하도록 하는 것이 목적이므로 설정치 근처에서의 원활하고 정밀한 제어를 위해서 다음과 같이 소속함수를 설정하였다.

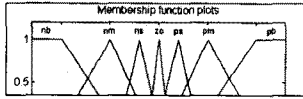


그림 2-1 오차(e)의 소속함수

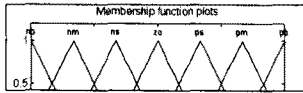


그림 2-2. 오차의 변화량(ce)의 소속함수

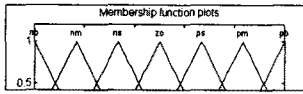


그림 2-3. 출력(cu)의 소속함수

나. 퍼지 제어 규칙

퍼지 제어를 구현하기 위한 퍼지 제어 규칙은 전건부와 후건부 형식 (if - then 형식)을 사용해서 아래와 같이 표현된다.

if e is A_i and ce is A_j then cu is B_k

A_i : 기준 입력과 자석막대의 각도의 차이

A_j : 시간에 대한 오차의 변화량

B_k : 모터의 입력 전압

본 논문에서 설계한 제어 규칙은 MacVier - Whelan의 제어 규칙을 변형하여 설계하였으며, 제어 입력 변수는 2개(e, ce)이고 각각의 변수에 대하여 7개의 언어변수를 정의하였으므로 가능한 규칙의 조합은 49개이다. 하지만 연산량이 많은 퍼지 시스템에서 시스템 제어를 원활히 수행하기 위한 최소한의 Sampling Time 을 확보하기 위해 퍼지수를 최소화해야 할 필요가 있었으므로 가장 필요한 규칙만을 사용하였다. 이를 위하여 먼저 앞에서 구한 아라고 원판의 수학적 모델링에 근거하여 입력변수 e와 ce의 변화에 따른 출력변수 cu의 변화를 MATLAB / simulink 를 통해 시뮬레이션을 해봄으로써 원하는 응답을 얻을 수 있는 가장 적은 수의 룰을 구할 수 있었다.

IF	nb	nm	ns	zo	ps	pm	pb
nb							
nm							
ns							
zo							
ps							
pm							
pb							

표 1. 퍼지 제어규칙

사용된 퍼지 제어 규칙은 표 1에 나타내었으며, 세로축은 오차(e)로 가로축은 오차의 변화량(ce)으로 설정하였다. 최소한의 제어 규칙을 이용하여 원하는 출력을 얻기 위하여 비선형 퍼지변수를 이용하였으므로 제어 규칙은 모든 영역이 아닌 zero 근처에 집중적으로 사용함으로써 더욱 효과적인 결과를 얻을 수 있었다.

다. 퍼지 추론

퍼지 추론 과정은 퍼지룰을 이용하여 퍼지 입력에 대한 퍼지 출력을 추론해 내는 장치이며, 퍼지 추론 방법으로는 제어 시스템과 관련하여 많이 이용되고 있는 맘다니의 Min-Max 직접법(Direct Method)에 의하여 추론을 수행하였다.

라. 비퍼지화(Defuzzifier)과정

비퍼지화 과정은 퍼지한 제어 출력값을 크리슝(crisp)한 제어 출력값으로 변환하는 과정으로서 가장 널리 사용되고 있는 무게 중심법을 이용하였다. 그리고 이렇게 구해진 제어 출력값의 범위를 그에 해당하는 전체 집합(Universe of Discourse)으로 변환(Scaling Mapping)시켜 주기 위해 1.4838의 값을 곱해 주었다.

2.3 아라고 원판 시스템의 실험장치 구성

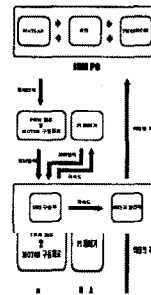


그림 3. 아라고 원판 시스템의 전체 시스템 구성도

본 논문에서는 자석 막대의 각도를 일정하게 유지시키는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 포토쇼미터를 이용하여 자석 막대의 각도를 측정하며 이 값을 퍼지 제어기의 입력 값으로 제공하여 원하는 각도를 유지할 수 있는 제어 입력값(모터 구동회로의 입력 전압)을 구한다.

아라고 원판 시스템은 그림 3과 같이 구성되어 있다. 시스템은 전체적으로 아크릴로 제작되어 있으며 직류 전동기와 직축으로 알루미늄 원판을 연결하여 회전할 수 있도록 하였고, 4개의 자석과 추가 부착된 막대는 자유롭게 회전할 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 RTI30이라는 프로그램을 사용하여 직접 TMS320c3x와 외부회로를 연결해 주었으므로 별도의 A/D, D/A 컨버터와 인터페이스 장치를 필요로 하지 않는다.

2.4 시뮬레이션

시뮬레이션은 MATLAB 의 simulink를 이용하여 수행하였다. 본 논문에서는 제어기의 추종 능력을 알아보기 위해 자석 막대의 각도를 90° 에서 120° 로 120° 에서 90° 로 각각 이동시켜 보았다.

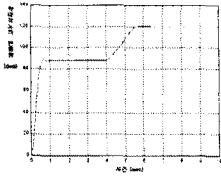


그림 4. 기준 값을 90° 에서 120° 로 변화할 경우

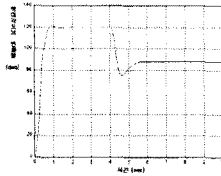


그림 5. 기준 값을 120° 에서 90° 로 변화할 경우

2.5 실험 결과

다중 동작점에 관한 제어기의 추종(tracking) 능력을 알아보기 위해서 자석 막대의 각도를 90° 에서 120° 로, 120° 에서 90° 로 각각 이동시켜 보았다. 결과 그래프에서 볼 수 있듯이 퍼지 제어기는 조정 능력 뿐만 아니라 추종 능력에서도 우수한 성능을 나타내었다.

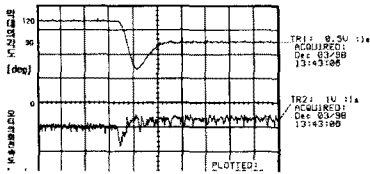


그림 6. 기준값을 90° 에서 120° 로 변화할 경우

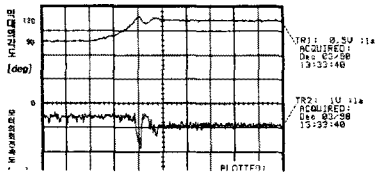


그림 7. 기준값을 120° 에서 90° 로 변화할 경우

3. 결 론

본 논문에서는 아라고 원판 시스템을 제어 대상으로 하여 퍼지 제어기를 설계하고 그 성능을 평가하였다. 기존의 아라고 원판 시스템을 위해 사용한 LQ 제어기나 H_2/H_∞ 제어기의 경우 선형화 되어진 시스템 모델을 토대로 제어기를 설계하였기 때문에 하나의 동작점(operating point)에 대해서만 제어할 수 있었다. 하지만 퍼지 제어기는 시스템의 모델을 필요로 하지 않으므로 다중 동작점에 대해서도 좋은 성능을 나타낸다는 것을 실험을 통하여 알 수 있었으며 DSP를 사용하는 경우 제어 알고리즘이 DSP내에서 소프트웨어로 처리되므로 향후 보다 개선된 제어 알고리즘을 적용하고자 할 경우에도 하드웨어를 변경하지 않고 소프트웨어만으로 쉽게 구현할 수 있다. 또한 제어 알고리즘을 적용하

고자 할 경우에도 하드웨어를 변경하지 않고 소프트웨어만으로 쉽게 구현할 수 있다는 장점을 갖게 된다.

앞으로의 연구과제는 제한한 퍼지 제어기의 안정성을 이론적으로 규명하는 것이고, 전문가와 숙련된 조작자의 지식을 습득하기 위한 효율적이고 체계적인 방법을 연구하고자 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] 최근호, "아라고 원판 시스템의 자세 제어에 관한 연구," 성균관대학교 공학 석사 학위 논문, 1994.
- [2] 안재홍, " H_2/H_∞ 혼합 제어 기법을 이용한 아라고 원판 시스템의 자세 제어에 관한 연구," 성균관대학교 공학 석사 논문, 1996.
- [3] J. G.Niessen and O. T. Tan, " The induction machine operating demonstrated by Arago's Disk," IEEE Trans. on Education, Vol. 32, No. 2, May pp.160-162, 1989.
- [4] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in control system : Fuzzy logic controller - part I," IEEE Trans, Syst, vol. 20. no. 2, pp404-418. 1990.
- [5] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in control system : Fuzzy logic controller - part II," IEEE Trans, Syst, vol. 20. no. 2, pp419-435. 1990.