

## 퍼지제어기를 이용한 AC Servo Motor의 속도제어에 관한 연구

유형상\* 차인수\* 이권현\*  
\* 동신대학교 전기전자공학과

박해암\*\*  
\*\* 광주보건 전문대학 정보처리학과

### A Study on AC Servo Motor Speed Control with Fuzzy Controller

Yoon Hyung-Sang\* Cha In-Su\* Lee Kwun-Hyun\*  
\*Dept. of Electrical and Electronic Eng.  
Dong Shin University

Park Hae-Arn\*\*  
\*\*Information Processing  
Kwang Ju Health Junior College

#### Abstract

In this paper a drive strategy of AC Servo Motor using Fuzzy method was proposed. Since the transfer function of the plant is nonlinear and very complicated, there are difficulty in driving the system with real time.

The performance of out method is confirmed by computer simulation and experimental results. The high performance and high accuracy of the driving system, Fuzzy is designed and proposed.

#### 1. 서론

서보인계의 최근 추세가 정류자판과 브러쉬로 인해 유지, 보수가 어려운 직류 전동기 대신, 유지 보수가 용이하고 견고한 AC 서보 모터로 전환되어 가고 있는 점을 감안하면 AC Motor의 디지털화가 대단히 중요하다고 볼 수 있는데 종래의 추정 알고리즘은 DC Motor를 대상으로 한 것으로 AC Motor에 대한 언급은 없다. 이는 DC Motor의 등가 모델이 선형이기 때문에 추정 알고리즘의 도출이 비교적 쉬운 반면 AC Motor는 비선형인 까닭에 그 과정이 매우 복잡하고 어렵기 때문이다.<sup>[1][2]</sup>

AC서보 드라이브가 우수한 제어 성능을 내기 위해서는 정밀 토크 제어가 요구되며 따라서 정밀한 전류제어가 필수적이다. 또한 PWM인버터에서 출력하는 전압파형의 정밀도도 정밀 토크제어에 큰 영향을 끼친다.<sup>[3]</sup>

본 연구에서는 전류제어형 인버터를 이용한 AC Servo Motor의 속도를 제어하기 위해서 퍼지제어기를 구성하였다.

#### 2. AC Servo Motor의 수학적 모델

##### 2.1. AC Servo Motor의 등가 회로

그림 1은 영구자석에 의한 기차력원을 일정한 전류원에 의한 것 처럼 생각하여 AC Servo Motor를 등가회로로 표현한 회로이다.

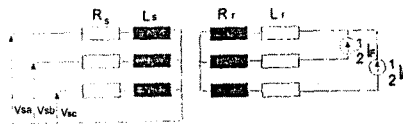


그림 1. AC Servo Motor의 등가회로  
Fig.1. Equivalent circuit of AC Servo Motor

#### 2.2 전압 및 전류 합성치

##### 2.2.1 고정자측의 전압 및 전류합성치

a상을 기준으로 한 합성 인가 전압  $V_s(t)$ 를 벡터 합성법을 이용하여 구하면 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} V_s(t) &= V_m(t) + aV_{sb}(t) + a^2V_{sc}(t) \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{2} V_e e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (1)$$

(단,  $I_s = \frac{3\sqrt{2}}{2} I_e e^{j\omega t}$  이다.)

고정자측 전류의 합성치를  $i_s(t)$ 라 두고 전압의 경우와 마찬가지로 전류의 합성치를 구해보면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} i_m(t) &= i_m(t) + ai_{sb}(t) + ai_{sc}(t) \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{2} I_e e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (2)$$

##### 2.2.2 회전자측의 전압 및 전류 합성치

회전자측 전류의 합성치를  $i_r(t)$ 라 두면 고정자의 경우와 마찬가지로  $i_r(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_m(t) &= i_m(t) + ai_{rb}(t) + ai_{rc}(t) \\ &= \frac{3}{2} I_F \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 알수 있듯이 회전자측의 가상 전류의 합성치가 시간에 관계없이 항상 일정한 값으로 된다.

##### 2.3. 합성치를 이용한 전압 방정식

합성자속을  $\phi_s(t)$ 라 하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \phi_m(t) &= \phi_m(t) + a\phi_{sb}(t) + a\phi_{sc}(t) \\ &= L_s i_s(t) + M i_r(t) e^{j\theta} \end{aligned} \quad (4)$$

전압, 전류, 자속 등의 합성치들에 대한 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$V_s(t) = R_s i_s + \frac{d\Phi_s(t)}{dt} \quad (5)$$

식(5)에 식(4)을 대입하면 전압 및 전류의 합성치에 대한 방정식은 결국 다음식(6)으로 된다.

$$V_s(t) = R_s i_s(t) + \frac{d}{dt} [L_s i_s(t) + M i_r(t) e^{j\theta}] \quad (6)$$

### 2.4. 2상 좌표계에서의 전압 방정식

과도상태 등의 해석을 위해 잘 사용되는 2상 좌표계는 고정자속을 기준으로하는 고정좌표 ( $\alpha-\beta$ ) 계와 동기속도로 회전하는 회전좌표 ( $d-q$ )계로 나누어진다. 그림 2는 고정좌표 ( $\alpha-\beta$ )와 회전좌표 ( $d-q$ )축의 관계를 나타낸 것이다.

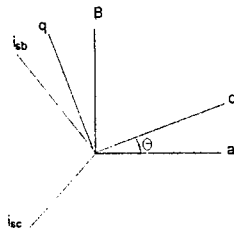


그림 2. 2상 좌표

Fig. 2 Two Phase Coordinates system

평형3상 입력의 회전좌표계로의 변환 및 역변환은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta-\gamma) & \cos(\theta+\gamma) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta-\gamma) & -\sin(\theta+\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta-\gamma) & -\sin(\theta-\gamma) \\ \cos(\theta+\gamma) & -\sin(\theta+\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 3. 퍼지 논리 제어기

그림3은 AC Servo Motor 속도 제어를 위해서 퍼지제어기를 나타낸 블럭선도이다.

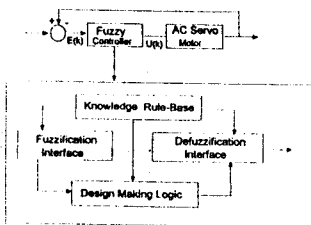


그림 3. 퍼지제어기 블럭선도

Fig.3. Block diagram of fuzzy controller

#### 3.1. 퍼지화

본 연구에서의 퍼지제어기는 2개의 입력변수를 갖는데, 샘플링 구간 k에서의 입력변수 E(k)와 dE(k)는 다음과 같이 정의 된다.

$$E(k) = \text{setpoint} - \text{outputpoint} \quad (9)$$

$$dE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (10)$$

변수는 7단계, 즉 PB(Positive Big), PM(Positive Middle), PS(Positive Small), ZO(zero), NS(Negative Small), NM(Negative Middle), NB(Negative Big)로 정하였으며, 그림 4는 입출력에 대한 7개의 기본 언어변수에 따른 삼각형 모양의 소속함수를 갖도록 하였다.

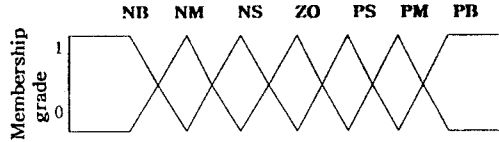


그림 4. 소속함수

Fig. 4 Membership Function

#### 3.2. 추론방법

표 1은 퍼지제어기의 제어규칙을 나타내는데, 여기서 행렬의 각각의 요소들은 E(Error), dE와 컨버터의 시비율 변화량 dD를 나타낸다.

표1. 퍼지제어규칙.

Table. 1 Fuzzy Rule

dE E	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO	NB	ZO	NB	NB	NS	NB
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	ZO	NM	ZO	NS	NS	PS	NS
ZO	NS	NM	ZO	ZO	ZO	PM	PS
PS	PS	NS	PS	PS	ZO	PM	ZO
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	PB	PS	PB	PB	ZO	PB	ZO

표1에서 제어 규칙의 한가지 예를 들면 다음과 같다.

IF E is PB AND dE is ZO THEN dD is PB.

즉, "전동기의 최대속도와와 측정전압의 차가 심하고 전압편차가 0일때 듀티비는 크게 하라."라는 의미이다. 결국은, 입력신호 E를 영 (zero)이 되도록 제어 규칙을 설계하여야 한다.

그림 4에 나타낸 언어변수에 대한 소속함수와 표1과 온 제어규칙에 의하여 본 연구에서 가장 많이 사용되는 MAX-MIN합성법을 이용하였다.

#### 3.3. 비퍼지화

제어기의 출력값은 퍼지변수으로써 소속함수로 표현되는 반면에 실제 플랜트에는 퍼지변수가 적합하지 않으므로 플랜트에 적합한 보통값(crisp value)으로 변환하는 과정인 비퍼지화 단계가 필요하다. 일반적인 비퍼지화 방법으로는 최대평균방법(Mean of Maximum Method)과 무게 중심방법(Center of Area Method)을 많이 사용하는데 본 연구에서는 무게중심방법을 이용하고 이산적인 계산을 수행하기 위해서는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$dD_n = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(dD_j) \cdot dD_j}{\sum_{j=1}^n \mu(dD_j)} \quad (11)$$

여기서,  $n$ 은 제어입력 변화량에 대한 양자화 단계이고,  $dD_j$ 는  $j$ 번째 양자화 단계에서 제어입력 변화량을 의미하며,  $\mu(dD_j)$ 는 그 변화량에 대한 소속함수값을 나타내고 있다.

#### 4. 시뮬레이션 및 결과 검토

시뮬레이션에 사용된 AC 서보 전동기의 파라미터는 표1과 같았다. 또한 제어 프로그램은 flow chart는 그림 5와 같다. 그림 6은 속도 제어시 일반적인 P, PI제어기와 피지제어기를 시뮬레이션하여 비교한 것이다. P, PI제어기가 상승시간이 피지제어기에 비해 빠른 반면 오버슈트가 생기는 것을 알수가 있으며 피지제어기는 상승시간이 PI제어기에 비해서 느리나 오버슈트 없이 정상상태에 도달하는 것을 알수 있었다.

표2. AC Servo 전동기의 사양  
Table 2. AC Servo Motor Rating

정격 출력	850W	순시최대전류	100/170A
정격 토크	105kg.cm	전기자 저항	0.78/0.28Ω
정격 회전수	1000RPM	유기전압상수	95/56.5Ω
정격 전압	100/80 V	토크 상수	9.2/5.5kg.cm/A
정격 전류	11/18 A	기계적시간상수	10 m.s
순시최대토크	800kg.cm	전기적시간상수	4.7 m.s

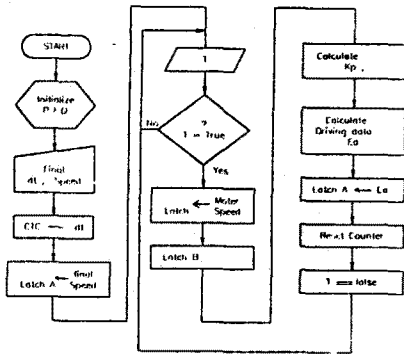


그림 5. 시스템 제어 흐름 선도  
Fig. 5. Flow chart of controll system

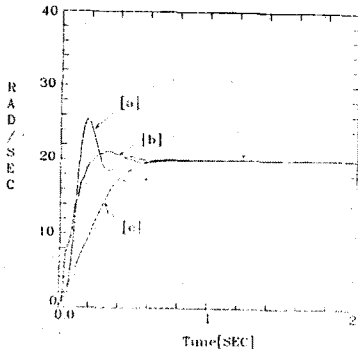
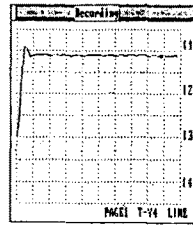
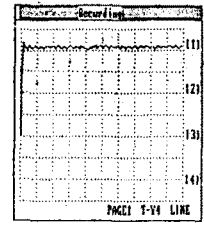


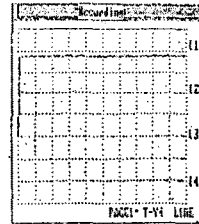
그림 6. P, PI 및 피지제어기 속도응답  
(a) P, (b) PI, (c) 피지제어기  
Fig. 6 Speed response of P, PI and FLC  
(a) P, (b) PI, (c) FLC



(a) P



(b) PI



(c) FLC

그림 7. P, PI 및 피지제어기에 의한 AC Servo Motor의 속도응답  
(a) P, (b) PI, (c) 피지제어기

Fig. 7. Experimental Speed response of P, PI and FLC  
(a) P, (b) PI, (c) FLC

그림 7은 실제 AC Servo Motor의 P, PI 피지제어기를 이용했을 때 속도 응답 곡선을 나타낸다. 피지제어기에 의한 속도 응답이 제일 좋은 수렴 특성을 보이고 있다.

#### 5. 결론

실험 파형에서 보듯이 Fuzzy 속도 수렴 특성이 일반적인 제어기인 P, PI 제어기에 비해서 좋을 수 있다. 이는 교류 서보 전동기의 Digital 및 속도제어를 통해서 고정도, 고속, 고빈도의 속도 제어가 요구되어지는 산업제에 고기능, 고성능, 민용성을 갖는 서보드라이버의 국산화에 도움이 되리라 사려되니 추후에는 DSP를 통한 전체 시스템의 Full digital을 추구하고자 한다.

#### 참고문헌

1. Yasuyuki Shgiura, et al. "High Resolution Digital Detection Method for Servo Motor", T.IEE Japan, Vol.108-D, No.1, 1988
2. Rlessmeier, et al, "Microprocessor-controlled AC Servo Drives with Synchronous or Induction Motors : Which is preferable?", IEEE-IAS Annual Meeting Conf. Records, 1985
3. Joachim Holtz, "Optimal Pulsewidth Modulation for AC Servos and Low-Cost Industrial Drives" IEEE-IAS 92, 1992, pp.1010-1018