

# 교류 서보 전동기의 속도제어를 위한 뉴로-퍼지 관측기설계

Neuro-Fuzzy Observer Design for Speed control of AC Servo Motor

반기종\*, 최성대\*, 윤광호\*, 남문현\*\*, 김낙교\*\*

Ban Gi Jong\*, Choi Sung Dai\*, Yoon Kwang Ho, Nam Moon Hyon\*\*, Kim Lark Kyo\*\*

**Abstract** - This paper presents an Fuzzy-Neuro Observer system for an ac servo motor dirve to track periodic commands using a neuro-fuzzy observer. AC servo motor drive system is rather similar to a linear system. However, the uncertainties, such as machanical parametric variation, external disturbance, uncertainty due to nonideal in transient state. therefore an intelligent control system that isan on-line trained neural network controller with adaptive learning rates.

**Key Words** : Observer, AC Motor, Controller, Neuro-Fuzzy

## 1. 서 론

교류서보전동기는 직류전동기 및 유도 전동기에 비해 정격속도 하에서는 선형적 속도제어가 가능하며, 간단한 구조와 높은 자속밀도 낮은 관성능률, 적은 잡음과 고효율 등의 장점을 가진다.

최근까지, 속도 제어를 위하여 속도를 검출하기 위하여 레졸버와 엔코더등을 사용하였다. 그러나, 고가로 인한 경제적인 문제점과 센서의 안정성을 확보하기 어려운 문제점을 가지고 있다. 따라서 이러한 센서가 가지는 문제들을 해소하기 위해 속도센서를 이용하지 않고 전동기의 속도를 검출하는 방법에 대해 많은 연구가 진행되고 있으며, 속도관측기를 설계하여 속도를 추정하는 방식의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들 속도 센서리스 운전에 대한 연구 관점은 크게 두 가지로, 과도상태에서의 응답특성 개선과 저속에서의 운전 특성 향상을 들 수 있다.[1-2]

전동기 센서리스 운전에 대한 초기의 연구에서는 전동기의 전압과 전류를 측정하여 전동기 모델로부터 속도를 연산하는 방식을 취해왔으나, 근래에는 현대제어 이론 중 관측기 이론을 적용하여 속도 추정 및 센서리스 운전을 위한 다양한 연구가 시도되고 있다

센서리스 운전을 위한 관측기로는 루엔버거 관측기와 슬라이딩 관측기 및 고이득 관측기가 있다. 1964년 D.G. Luenberger에 의해 제안된 Luenberger 관측기는 속도관측기로 사용하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있으며 상태를 관측하기 위해 시스템의 동특성이나 내부파라미터를 알아야

한다는 문제점을 가지고 있다.

Khalil이 제안한 고이득 관측기는 시스템의 동특성 및 내부 파라미터에 대한 정보를 필요로 하지 않는다. 그러나 이득이 관측상태의 개수에 비례해서 제곱 꼴로 커지게 되므로 관측 초기의 과도상태 및 관측하려는 상태의 급격한 변화에 대하여 관측오차가 심하게 진동하는 원인이 될 수 있다.

슬라이딩 관측기는 G.B Wang과 S.S Peng 등이 제안하였으며 내부파라미터를 알아야 할 필요는 없지만 시스템 동특성에 대한 정보를 필요로 하며, 외란 억제 성능은 우수하나 불연속적인 입력으로 인한 추정 치의 떨림 현상이 발생한다는 문제점을 가지고 있다[3-4].

이러한 여러 관측기들의 문제점을 극복하기 위하여 현재 지능형 제어기법이 다양하게 도입되고 있으며, 그 중 대표적인 방식이 퍼지 및 신경회로망 기법이다.

G. Griva 와 F. Profumo가 제안한 Fuzzy-Like Luenberger 관측기는 Luenberger 관측기의 관측기 이득을 미리 경험적으로 만든 퍼지시스템의 Look-Up Table를 통하여 조정하는 방식으로 소속함수와 같은 퍼지화 단계에서부터 선형 규칙을 사용하여 비선형성이 많이 존재하는 전동기 제어시스템에서는 출력이 저하되는 특성을 나타내게 된다[5].

본 논문에서는 전동기 속도제어 시 속도검출을 위한 센서들의 문제점을 개선과, Luenberger 관측기의 도함수 추정의 문제 그리고 고이득 관측기의 경우 관측기의 이득이 관측상태의 개수에 비례해서 제곱꼴로 커짐으로써 생기는 문제점들을 개선하였고, 관측 속도의 안정성을 위하여 관측오차의 이득을 신경회로망 제어기법 중 실제 널리 쓰이는 오류역전과 학습기법을 이용하여 자동동조 하여 관측기의 이득 값을 최적값으로 선정하여 기존의 방식에 비해 과도특성 및 정상특성이 우수한 뉴로퍼지 관측기를 설계하였다.

저자 소개

\* 正 會 員 : 건국大學 전기공학科 博士課程

\*\* 正 會 員 : 건국大學 전기공학科 教授 · 工博

## 2. AC Servo motor 모델링

교류서보 전동기의 각 파라미터들을 정리하면 다음과 같다.

$V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$ : 고정자 상전압,  $w_{re}$ : 자석의 전기 각속도,  $R_s$ : 고정자 권선 저항,  $L_s$ : 전기자 권선의 자기 인덕턴스,  $M$ : 전기자 권선 사이의 상호 인덕턴스,  $\theta_{re}$ : 각 변위

식 (2-1)은 위 그림의 영구자석형 동기전동기에 3상에서의 전압 방정식이다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pM^1 - \frac{1}{2} pM - \frac{1}{2} pM \\ -\frac{1}{2} pM \\ R_s + pM^1 - \frac{1}{2} pM \\ -\frac{1}{2} pM \\ -\frac{1}{2} pM - \frac{1}{2} pM \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix}$$

$$M^1 = l_s + M \quad (2-1)$$

일반적으로 3상이 평형(3상 전류 또는 전압의 합이 영이다) 하므로 식 (2-1)은 식 (2-2)과 같이 간략히 표현하게 된다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & 0 \\ R_s + pL_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix}$$

$$L_s = l_s + \frac{3}{2} M \quad (2-2)$$

식 (2-1)과 (2-2)의 파라미터 값들을 정리하면 다음과 같다.

$i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$ : 고정자 상전류

$e_{as}, e_{bs}, e_{cs}$ : 각상의 고정자권선에 유기 되는 속도기전력

$l_s$ : 전기자 권선의 누설 인덕턴스,  $p$ : 미분 연산자 ( $\frac{d}{dt}$ )

영구자석계자에 의하여 유기 되는 최대 자속을  $\Phi_f$ 라

한다면 3상 전기자 권선의 쇄교 자속수  $\Phi_{fa}, \Phi_{fb}, \Phi_{fc}$ 는 다음과 같다.

$$\Phi_{fa} = \Phi_f \cos \theta_{re}$$

$$\Phi_{fb} = \Phi_f \cos(\theta_{re} - \frac{2\pi}{3}) \quad (2-3)$$

$$\Phi_{fc} = \Phi_f \cos(\theta_{re} + \frac{2\pi}{3})$$

여기서  $\theta_{re}$ 는 a상 전기자 권선을 기준으로 회전한 계자 각도이고 전기각속도와는 식 (2-4)과 같은 관계가 있다.

$$\theta_{re} = \int w_{re} dt \quad (2-4)$$

따라서 속도 기전력  $e_{as}, e_{bs}, e_{cs}$ 는 다음과 같다.

$$e_{as} = p\Phi_{fa} = -w_{re}\Phi_f \sin \theta_{re}$$

$$e_{bs} = p\Phi_{fb} = -w_{re}\Phi_f \sin(\theta_{re} - \frac{2\pi}{3}) \quad (2-5)$$

$$e_{cs} = p\Phi_{fc} = -w_{re}\Phi_f \sin(\theta_{re} + \frac{2\pi}{3})$$

## 3. 뉴로-퍼지 관측기 설계

### 3.1 퍼지동조기법을 이용한 관측기설계

본 논문에서는 교류서보전동기의 속도 센서리스 제어를 위하여 교류서보전동기의 전기적 동특성을 이용하여 속도를 관측한다. 뉴로-퍼지 시스템은 Leunberger 관측기의 관측이득을 조정하기 위하여 도입하였다. 퍼지 시스템의 입력으로는 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수가 사용되며 비선형 삼각형 소속함수를 이용하여 퍼지화 과정을 수행하였다. 비 퍼지화 방법은 가장 일반적으로 사용되고 성능이 우수한 무게중심방법을 사용하였다. 무게 중심 방법은 식 (3-1)과 같다. 를 퍼지화 하고 뉴로시스템에 사용되어진다.

식 (3-1)은 퍼지규칙을 나타낸다.

$$\mu_0 = \frac{\sum_{j=1}^k \mu(u_j) \cdot u_j}{\mu(u_j)} \quad (3-1)$$

신경회로망 부분은 널리 쓰이는 학습 방법중 하나인 오류 역전파 알고리즘을 사용하였다.

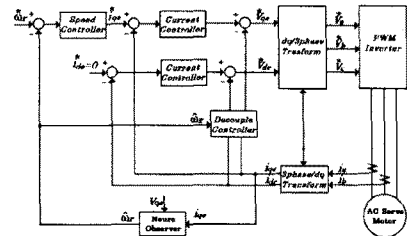


그림 1. 시스템 구성도

### 3.2 Backpropagation Learning Algorithm

McClelland 와 Rumelhart 등에 의해 개발된 backpropagation 모델은 다층 전향 적용 신경회로망으로 처리 단자간의 연결강도를 최급하강법에 의해 반복적으로 연결강

리단자간의 연결강도를 최급하방법에 의해 반복적으로 연결강도를 조정함으로써 학습된다.

입력 패턴 ai 가 신경회로망에 입력되어 전향전달(forward propagation)되면 각 단자의 활성화은 식 3.2 과 같이 미분가능, 비감소 활성화함수 sigmoid function 에 의해 결정된다.

$$F(net) = \frac{1}{1 + e^{-net}} \quad (3.2)$$

은닉층에서의 시그모이드 함수는

$$F(net_{ji}) = H_j$$

출력층에서의 시그모이드 함수는  $F(net_{jk}) = O_k$  . 출력층에서의  $\delta$ 값은

$$e_k = 0.5x(t_k - O_k)^2, \delta_k = F'(net_{jk})(t_j - O_j)$$

은닉층에서의  $\delta$ 는  $\delta_k = F'(net_{jk}) \sum_j \omega_{jk} \delta_j$

이  $\delta$ 값을 이용하여 연결 가중치를 조절하는 식은 다음과 같다.

$$\omega_{ji(new)} = \omega_{ji} + \Delta\omega_{ji}$$

$$\Delta\omega_{ji} = \eta \delta_j a_i + \alpha(\omega_{ji} - \omega_{ji(old)})$$

은닉층에서 출력층으로의 새로운 가중치는

$$\omega_{jk(new)} = \omega_{jk} + \Delta\omega_{jk}$$

$$\Delta\omega_{jk} = \eta \delta_k a_j + \alpha(\omega_{jk} - \omega_{jk(old)})$$

여기에서  $\eta$ 는 학습율을 나타내며  $0 < \eta < 1$  사이의 임의의 수를 사용하고 모멘텀 계수  $\alpha$ 는  $0 < \alpha < 1$  사이의 값을 사용한다.

#### 4. 실험결과

본 논문에서 제안한 신경망 제어기의 속도성 및 안정성을 평가하기 위하여 교류서보전동기의 속도 제어 실험을 실시하였다. 실험은 히스테리시스 다이내모미터 부하를 이용하였다. 제안한 뉴로퍼지 관측기를 400[W] 교류 서보 전동기에 적용하여 슬라이딩 관측기를 이용한 경우를 실험하여 본 논문에서 설계한 뉴로 관측기의 속도 추정 성능을 입증하였다.

실험에 사용한 모터의 정격 속도는 3000 rpm이며, 정격 속도에서 다이내모 미터 부하를 1kgf.cm을 주었다.

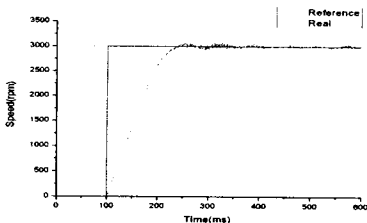


그림 2. 슬라이딩 관측기의 제어 특성 [3000rpm] [ 1kgf.cm부하]

그림 2.는 1kgf.cm의 부하를 인가하고 슬라이딩 관측기에 의한 특성을 나타내며 그림 3은 1kgf.cm부하시 뉴로-퍼지 관측기에 의한 속도 특성을 나타낸다.

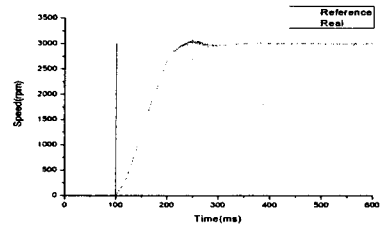


그림 3. Neuro-fuzzy 관측기의 속도특성 [3000rpm] [ 1kgf.cm부하]

그림 2. 와 그림 3.에서와 같이 뉴로-퍼지관측기를 적용후의 속도성과 과도응답특성이 기존 제어기보다 우수한 성능을 나타내었다.

#### 5. 결론

본 논문에서 제안한 neuro-fuzzy 관측기를 이용한 제어기는 교류서보전동기의 속도제어에서 일반 PI 보다 오버슈트를 발생시키지 않았다. 또한 settling time을 단축하였으며 모터 기동시의 전류 peak 값도 PI 제어기에 비해 작았다. 그리고 파라미터 변화에도 적응하는 능력을 나타내었으며 본 논문에서 제안한 뉴로-퍼지 관측기를 통해 기존 제어기에 비해 속도성 및 안정성에서 우수함이 입증되었다.

#### 참고문헌

- [1]. J. Yoshitsugu, E. Hiraki, M. Nakaoka, K. Inoue, "Active edge-resonant DC link snubber-assisted three phase soft switching inverter for AC servo drive," presented at the 27th Conf. Industrial Electronics Society, 2001.
- [2]. Dong-Il Kim, Jinwon Lee, Sungkwun Kim, "Control of permanent magnet AC servo motors without absolute rotor position transducers," presented at the 22th Annual IEEE Conf. Power Electronics Specialists, 1991.
- [3]. G. Ellis, "Observers in Control Systems," Academic Press, 2002.
- [4]. R.D. Lorenz, K. Van Patten, "High resolution velocity estimation for all digital, AC servo drives" presented at the Conf. Industry Applications Society Annual Meeting, 1988
- [5]. K. Shinohara, E. Sakasagawa, "A new PWM method with suppressed neutral point potential variation of three level inverter for AC servo motor drive" in Proc. Power Electronics and Drive Systems, 1999, pp.668 - 672

본 논문에서 제안한 뉴로 관측기는 현재 속도 관측기로 널리 사용되고 있는 고이득 관측기가 가지는 관측 이득이 관측상태의 개수에 비례해서 제곱꼴로 커짐으로써 생기는 단점인 관측오차의 진동 문제와 디지털화로 구현시 데이터 바이트 수의 크기조정에 제약의 문제점들을 보완하였고, 또한 관측속도의 안정성을 위하여 과도 상태시 관측오차의 포함수 항의 이득을 신경회로망 제어기법 중 실제 널리 쓰이는 오류역전파 학습기법을 이용하여 자동동조 할 수 있는 부분으로 설계하였다.

위의 알고리즘은 시스템의 동특성 및 내부 파라미터에 대한 정보를 필요로 하지 않을 뿐만 아니라, 고이득 관측기가 갖는  $\epsilon$  이 없어, 관측오차가 떨리는 현상을 나타나지 않게 하였다. 전류 포함수의 관측 속도 향상을 위해 관측오차를 미분하는 형태를 취하였으며, 그 미분계수  $D_n$  은 과도상태 시 섭동 현상이 일어날 수 있으므로 신경회로망에 의해 동조되도록 설계하였다. 본 논문에서 설계한 뉴로 관측기의 신경회로망 부분은 입력 층이 2개, 은닉 층이 8개 출력 층이 4개의 뉴런으로 구성하였다. 뉴로 관측기에서 관측기의 이득을 선정하는 방식은 교류 서보 전동기의 q축 전류와 q축 전류의 변화율을 신경회로망의 입력으로 하여 8개의 은닉 층을 거쳐 학습에 의해 최적의 이득 값을 얻을 수 있게 하였다. 또한, 제안한 뉴로 관측기를 교류 서보 전동기에 적용하여 전동기에서 측정된 q축 전류 값으로 q축 전류의 포함수를 직접 추정하며, 이 추정 값으로 회전자의 속도를 추정하고 추정된 속도를 이용하여 속도제어를 수행하는 새로운 형태의 속도센서리스 제어방식을 제안하였다. 학습기법은 실제 널리 쓰이고 있는 오류역전파방식의 학습법을 사용하여, 시뮬레이션을 통해 50회, 100회, 200회, 500회, 1000회를 학습시켜 최적의 학습율과 이득을 사용할 수 있도록 하였다.