

# 교류 서보 전동기의 속도제어를 위한 뉴러퍼지 관측기설계

論 文

55D-4-3

## Speed Control of AC Servo Motor Using Neural Network

潘基宗\* · 金洛教†  
(Gi-Jong Ban · Lark-Kyo Kim)

**Abstract** - In this paper, a neuro-fuzzy observer system is designed using neuro-fuzzy system for speed control of AC servo motor. This neuro-fuzzy observer is proposed to solve the problems occur in the Luenberger observer and sliding observer. The problems of Luenberger and sliding observer are to have to know the dynamics and internal parameters of the system. Performance of the neuro-fuzzy observer system has verified through the experiment with dynamometer load. It is shown that feasibility of the neuro-fuzzy observer is verified.

**Key Words** : Neural Network, AC Motor, Controller

### 1. 서 론

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

최근까지, 속도 제어를 위하여 속도를 검출하기 위하여 레졸버와 엔코더등을 사용하였다. 그러나, 이러한 센서들은 경제성의 저하와 센서의 안정성을 확보하기 어렵다. 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 관측기등이 있다. 1964년 Luenberger에 의해 제안된 Luenberger 관측기는 속도관측기로 사용하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있으며 상태를

관측하기 위해 시스템의 동특성이나 내부파라미터를 알아야 한다는 문제점을 가지고 있다[3].

Khalil이 제안한 고이득 관측기는 시스템의 동특성 및 내부 파라미터에 대한 정보를 필요로 하지 않는다. 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 Wang과 Peng 등이 제안하였으며 내부파라미터에 대한 지식이 없어도 되나 시스템 동특성에 대한 정보를 필요로 하며, 외란 억제 성능은 우수하나 불연속적인 입력으로 인한 추정치의 떨림 현상이 발생한다는 문제점을 가지고 있다[4].

Griva와 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].

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

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 오류역전파 학습기법을 이용하여 자동동조 하여 관측기의 이득 값을 최적값으로 선정하여 기존의 방식에 비해 과도특성 및 정상특성이 우수한 뉴로퍼지 관측기를 설계하고자 한다.

† 교신저자, 正會員 : 建國大學 電氣工學科 教授 · 工博  
E-mail : lkkim@konkuk.ac.kr

\* 正會員 : 建國大學 電氣工學科 博士課程  
接受日字 : 2005年 12月 13日  
最終完了 : 2006年 1月 24日

## 2. AC Servo motor 모델링

본 논문에서 사용한 교류서보 전동기의 각 파라미터들은 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

일반적으로 영구자석형 동기전동기에서 3상이 평형이므로 전압 방정식은 (1)과 같이 간략하게 표현된다.

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

$$L_s = l_s + \frac{3}{2}M \quad (1)$$

식 (1)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.

$$\begin{aligned} \Phi_{fa} &= \Phi_f \cos \theta_{re} \\ \Phi_{fb} &= \Phi_f \cos \left( \theta_{re} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \Phi_{fc} &= \Phi_f \cos \left( \theta_{re} + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\theta_{re}$ 는 a상 전기자 권선을 기준으로 회전한 계자 각도이고 전기각속도와는 식 (3)과 같은 관계가 있다.

$$\theta_{re} = \int w_{re} dt \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} e_{as} &= p\Phi_{fa} = -w_{re}\Phi_f \sin \theta_{re} \\ e_{bs} &= p\Phi_{fb} = -w_{re}\Phi_f \sin \left( \theta_{re} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ e_{cs} &= p\Phi_{fc} = -w_{re}\Phi_f \sin \left( \theta_{re} + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

## 3. 뉴로퍼지 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 관측이득

을 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 (5)와 같다.

$$\mu_0 = \frac{\sum_{j=1}^k \mu(u_j) \cdot u_j}{\mu(u_j)} \quad (5)$$

신경회로망 부분은 널리 쓰이는 학습 방법중 하나인 오류역전파 알고리즘을 사용하였다. 그림 1은 전체 시스템 구성도를 나타내며 그림 2는 뉴로퍼지 관측기의 구조를 나타낸다.

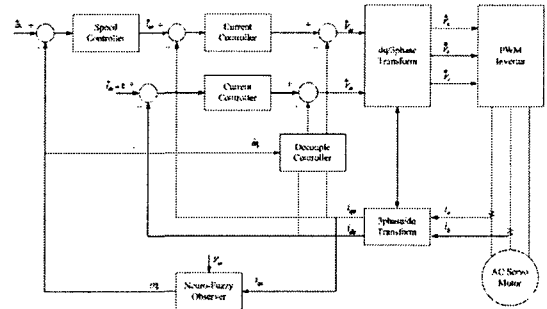


그림 1 시스템 구성도

Fig. 1 System configuration

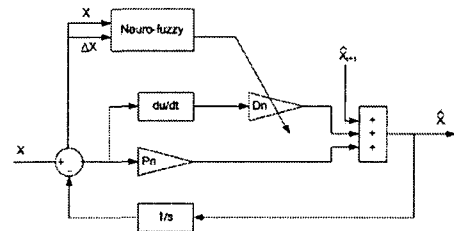


그림 2 뉴로퍼지관측기 구조

Fig. 2 Structure of a neuro-fuzzy observer

### 3.2 역전파 학습 알고리즘

McClelland 와 Rumelhart 등에 의해 개발된 역전파 모델은 다층 전향 적응 신경회로망으로 처리단자간의 연결강도를 최급하강법에 의해 반복적으로 연결강도를 조정함으로써 학습된다. 입력 패턴  $a_i$  가 신경회로망에 입력되어 전향전달(forward propagation)되면 각 단자의 활성값은 식(6)과 같이 미분가능, 비감소 활성함수 시그모이드 함수(sigmoid function)에 의해 결정된다.

$$F(net) = \frac{1}{1 + e^{(-net)}} \quad (6)$$

은닉층에서의 시그모이드 함수는

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

출력층에서의 시그모이드 함수는  $F(\neq t_{jk}) = O_k$ , 출력층에서의  $\delta$ 값은

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

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

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.

오류역전파 학습 방법은 제어이득의 초기값을 얻기 위해 off-line으로 1000회정도 학습을 하게 된다.

제어기의 이득은 이득동조 실험에 의해 각각 0.0023, 0.054, 0.054로 하였으며 목표값을 추종하도록 학습시켰다. 실험에 사용한 가중치는 미리 1000회 학습을 시켜서 사용하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

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

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

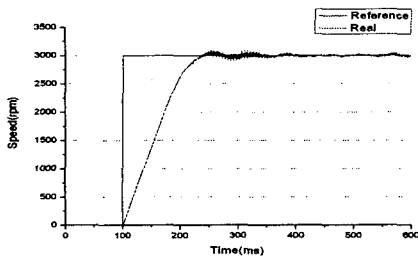


그림 3 슬라이딩 관측기의 속도응답[3000rpm]  
Fig. 3 Speed response for Sliding observer

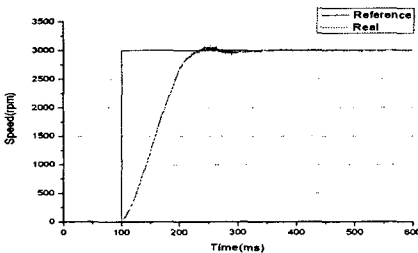


그림 4 Neuro-fuzzy 관측기의 속도특성 [3000rpm]  
Fig. 4 Speed response for Neuro-fuzzy observer

그림 3은 1kgf.cm의 부하를 인가하고 슬라이딩 관측기에 의한 특성을 나타내며 그림 4는 1kgf.cm 부하시 뉴로-퍼지 관측기에 의한 속도 특성을 나타낸다.

그림 3과 그림 4에서와 같이 뉴로-퍼지관측기를 적용후의 속응성과 과도응답특성이 기존 슬라이딩 관측기보다 우수한 성능을 나타내었다.

표 1 부하실험 결과

Table 1 Speed response of controller with load

관측기	최대값	정착시간 [ms]	상승시간[ms]	%Overshoot
슬라이딩관측기	3102.94	233.44	137.6	3.43
뉴로-퍼지관측기	3096.94	190.53	133.23	3.23

#### 5. 결 론

본논문에서 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 속응성 및 안정성에서 우수함이 입증되었다.

#### 참 고 문 헌

- [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, Vol.2, 29, pp.856-861, 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, pp.578-585, 1991.
- [3] G. Ellis, "Observers in Control Systems," Academic Press, 2002.
- [4] S. Li-Xia, Feng Yong, Yu Xing-Huo "Synchronization for a class of chaotic systems using a robust sliding mode observer", Control and Decision, Vol.19, No.3, pp.331-334, March 2004.
- [5] M. Abrate, G. Griva, F. Profumo, A. Tenconi, "High Speed Sensorless Fuzzy-Like Luenberger Observer" IEEE, PESC., Vol.1, pp.477-481, 1999