Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 12, No.3, pp. 139~146 August 1998

퍼지-신경회로망과 PLL을 이용한 교류서보시스템

(A.C. Servo System Using Fuzzy-Neural Network and PLL)

김진식* · 이현관** · 엄기환*
(Jin-Sik Kim · Hyun-Kwan Lee · Ki-Hwan Eom)

요 약

교류 서보시스템의 고속·고정밀 제어를 위하여 혼합형 지능제어방식을 제안하였다. 제안한 제어방식은 먼저 고속제어를 위하여 퍼지-신경회로망 제어방식을 이용하고, 오차가 설정된 범위안에 들어오면 PLL 제어방식을 이용한다.

제안한 제어방식을 3상 유도전동기의 속도제어에 대한 시뮬레이션 및 실험을 통하여 기존의 퍼지-신경회로망 제어방식과 제어성능을 비교 검토한 결과 우수함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we proposed the hybrid intelligent control method for fast response time and precise speed control of the AC Servo system. The proposed system first used the fuzzy-neural network control method for fast response time and when the error reaches the preset value, used the PLL control method.

In order to verify the advantage of the proposed method, the system is implemented.

The results of the simulation and the experiment of speed control to use the 3-phase induction motor as a plant, we verified excellency of the proposed control method to compare with the conventional fuzzy-neural network control method.

1. 서 론

최근의 자동화설비기기 또는 메카트로닉스 분야에 있어서 교류 서보 시스템의 고속·고정밀 제어에 대한 관심이 높아지고 있다. 일반적인 교류 서보 시스템 제어 방식의 종류로는 PID방식, 벡터제어 방식

* 동국대학교 전자공학과
** 호서전산원 정보통신과

접수일자 : 1998. 5. 4.

및 PLL 제어방식 등이 있으며 PID제어방식의 경우에는 주어진 동작점에 대한 선형화와 제어 파라미터의 최적조정 등이 문제가 된다. 또 주파수제어 방식인 벡터제어방식의 경우에서는 정확한 제어를 하기 위해서는 회전자의 자속이 동작 영역에 따라 변하기 때문에 회전자 자속의 동특성을 알아야 하며 자속의 변동에 따른 상수의 변동을 고려해야 한다[1~3].

근래에 와서 병렬처리 능력과 적응능력이 있으며, 임의의 비선형특성을 학습할 수 있는 신경회로망 제어방식은 A. K. Toh, L. Ben-Brahim, Y. Hiroshima 등에 의하여 연구가 있었으며 많은 연구들이 진행되고 있다[4~6]. 비선형특성에 강하고 전문가의 지식을 언어 모델링으로 이용하는 퍼지제어방식은 C. C. Lau, H. Ying 등에 의하여 보고가 있었으며 이와 같은 지능제어방식을 교류서보시스템에 적용하는데 많은 관심이 집중되고 있다[7~9].

Zadeh교수가 제안한 퍼지 알고리즘과 복잡한 시스템의 언어 모델링을 이용하는 퍼지제어방식에서는 제어규칙의 작성에 오랜 경험과 시간이 필요하게 되고, 입·출력 스케일링 요소의 조정, 소속함수의 선택 등에 문제가 있다[8].

신경회로망제어 방식에서는 신경회로망 제어기에 대하여 특별히 안정도 조건이 확립되어 있지 않아 은닉층의 수나 각 은닉층의 뉴런 수를 몇 개로 구성하는 것이 적합한지에 대한 문제점들이 있으며, 제어기를 구성하더라도 국부최소값에 빠지는 등 학습상에 문제가 존재한다[6, 10].

그러므로 퍼지제어방식과 신경회로망 제어방식이 갖는 서로의 특성들을 살리면서 지능제어 방식의 효율과 성능향상을 시킬 수 있는 방법으로 퍼지-신경회로망 제어방식이 여러 가지 응용 분야에서 많이 이용되고 있다[1, 9].

P. C. Sen, Jose Alvarez 등에 의하여 연구된 PLL(Phase-Locked Loop)제어방식은 정밀성을 가지고 기준 주파수에 동기화될 수 있으므로 AC서보 시스템에 자주 사용되고 있다. 그러나 PLL은 잠근(lock)상태로 루프(loop)를 가져가기 전에는 신뢰성에 문제가 있고, 많은 시간을 요구하므로 속응성이 떨어진다[11, 12].

따라서 본 논문에서는 교류서보시스템의 고속·고정밀 정속도제어 및 가변속속도제어를 위하여 혼합형 지능제어 방식을 제안한다. 제안한 제어방식은 고속제어를 위하여 퍼지-신경회로망 제어방식을 이용하고 고정밀 제어를 위하여 PLL 제어방식을 이용하는 혼합형 지능제어방식이다. 퍼지-신경회로망 제어방식은 적-대수합(product-addition)추론법을 갖는 퍼지논리시스템(Fuzzy Logic System : FLS)을 전방향회로망(Feedforward Network)으로 구성하고, 학습기능을 가질 수 있도록 gradient descent법을 이용하여 출력축에서 입력축으로 오차를 역전파시켜 FLS(Fuzzy Logic System)의 전건부 퍼지소속함수 및 후건부 연결강도를 자동조정하는 퍼지-신경회로망을 구성하여 직접제어기 형태로 하는 직접적응제어방식(Direct Adaptive Control Method)이다. 제어기의 입력신호는 교류서보전동기의 출력을 궤환시켜 설정된 기준속도와의 오차와 오차의 변화량을 사용한다.

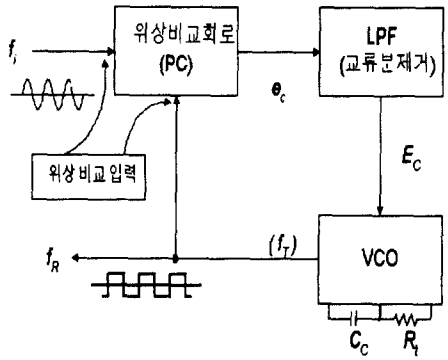
제안한 제어방식의 동작은 미리 설정된 오차값까지는 고속제어를 위하여 퍼지-신경회로망 제어방식이 사용되고, 설정된 오차 범위 안에 들어오면 고정밀 제어를 위하여 PLL제어 방식을 사용한다. 제안된 제어방식의 제어성능 특성을 비교 검토하기 위하여 3상 유도전동기의 가변속제어를 기존의 퍼지-신경회로망방식과 시뮬레이션 및 실험을 한다.

2. PLL (Phase-Locked Loop) 제어방식

PLL(Phase-Locked Loop)은 입력 신호에 대하여 주파수 뿐 아니라 위상까지 동기시킬 수 있는 부귀환 루프를 갖는 발진 회로로서 주파수를 가변할 수 있으며, 또 고정밀도인 것을 요구하는 발진기, 주파수 신세사이저, 수신기의 국부 발진기, 송신기, FM파 등의 복조기, 신호 회복, 주파수 멀티 플라이어, 톤 디코더 등 광범위하게 사용된다[2, 10].

기본적인 PLL의 회로구성은 그림 1과 같으며, 그림 1과 같이 2종류의 주파수를 비교해서 그 결과를 출력하는 위상 비교기(PC:Phase Comparator), 직류제어 입력 전압에 따라 발진주파수를 가변하는 전압제어발진기(VCO:Voltage controlled Oscillator), 그리고 위상비교기의 출력의 교류 성분을 제거해서 직류전압으로서 전압제어발진기에 공급하는 저역통과 필터(LPF:Low Pass Filter)로 이루어져 있으며, 위상비교기의 입력에 주어진 신호와 전압제어 발진기의

주파수 가변 범위에 따라 잠근범위(lock range), 즉 위상 동기가 가능한 주파수 범위가 결정되어진다.



f_i: 비교 입력전압　　f_R: 록(lock) 상태의 VCO 출력

e_c: 위상 비교의 결과　　f_T: VCO의 자주 발진 주파수

E_C: LPF를 통과한 e_c (VCO의 제어 직류 전압)

그림 1. PLL의 기본 구성과 각부 파형관계
Fig. 1. Basic construction of PLL and wave-form of each part

3. 퍼지-신경회로망 제어방식

퍼지-신경회로망은 중앙값과 표준편차를 변수로 갖는 가우시안 형태의 소속함수를 이용하여 입력변수의 퍼지화, T-norm(product-operation)을 이용한 퍼지추론, 무게중심법을 사용한 비퍼지화 단계를 전방향회로로 구성하는 퍼지추론망을 구성한다. 이 회로망의 출력 $\hat{f}$는 목표신호 f와 비교되어 오차를 발생시키고, 전건부변수와 후건부변수는 발생된 오차에 대하여 gradient descent법을 이용하여 조정된다 [1, 5].

퍼지-신경회로망 제어기의 구조는 그림 2와 같다.

퍼지-신경회로망의 입력변수를

$x_i\ (i=0,1,\cdots,n-1)$라 하고,

$l\ (l=0,1,\cdots,k-1)$번째 제어규칙에 대한 가우시안 형태의 소속함수 $\mu^l{}_{f_i}(x_i)$는 식(1)과 같으며 (그림 2에서는 i=2, l=5인 경우이다.)

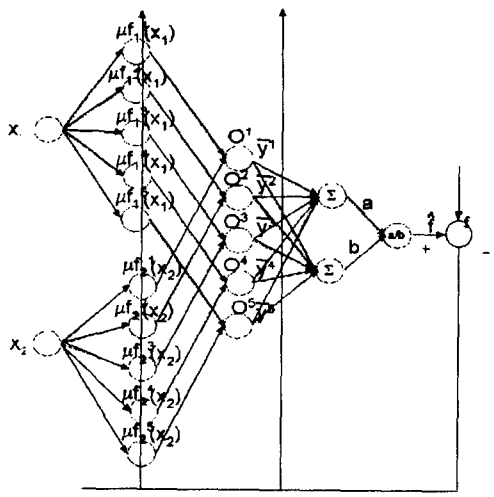


그림 2. 퍼지-신경회로망제어기의 구조
Fig. 2. Construction of Fuzzy-neural network

$$\mu^l{}_{f_i}(x_i) = \exp\left[-\left(\frac{x_i-\overline{x_i^l}}{\sigma_i^l}\right)^2\right] \qquad (1)$$

여기서 $\overline{x^l}_i$, $\sigma^l{}_i$는 각각 그림 3의 가우시안 형태의 소속함수의 중심, 표준편차를 나타낸다.

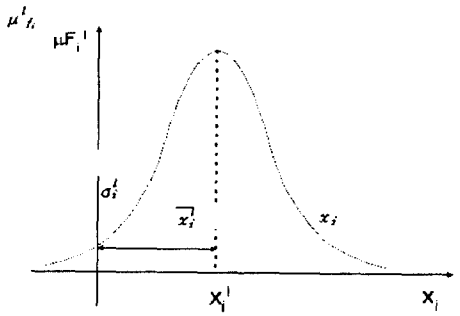


그림 3. 가우시안 형태의 소속함수
Fig. 3. Gaussian-type membership function

그림 2의 퍼지추론부 O^l는 product operation(연산자)을 사용한 것으로 식 (2)이다.

$$O^l = \prod_{i=1}^{n} \exp\left[-\left(\frac{x_i-\overline{x_i^l}}{\sigma_i^l}\right)^2\right] \qquad (2)$$

그림2의 비퍼지화부 $\hat{f}$는 추론후 퍼지집합을 실수로 변환하는 부분으로 식(3)과 같으며,

$$\hat{f}^1(x_1, x_2) = \frac{\sum_{l=1}^{5} \overline{y^l} \left[\prod_{i=1}^{n} \exp\left[-\left(\frac{x_i - \overline{x_i^l}}{\sigma_i^l} \right)^2 \right] \right]}{\sum_{l=1}^{5} \left[\prod_{i=1}^{n} \exp\left[-\left(\frac{x_i - \overline{x_i^l}}{\sigma_i^l} \right)^2 \right] \right]} \tag{3}$$

여기서 $\overline{y^l}$은 후건부 연결강도이며 n은 2인 경우이다.

퍼지-신경회로망 제어에서는 원하는 출력 f와 퍼지-신경회로망의 출력 $\hat{f}$와의 차로 인한 오차가 최소화되도록 역전파 알고리즘을 이용하여 $\overline{x_i^l}$, σ_i^l, $\overline{y^l}$를 자동으로 조정함으로써 퍼지-신경회로망 자체를 학습시킨다.

연결강도를 조정하기위해 식 (4)와 같은 목적함수를 이용한다.

$$J = \frac{1}{2}[\hat{f} - f]^2 \tag{4}$$

목적함수 J가 퍼지논리시스템의 가변 파라미터, σ_i^l, $\overline{x_i^l}$ $\overline{y^l}$에 대하여 최소화되도록 gradient descent 법을 이용하면

$$\overline{y^l}(k+1) = \overline{y^l}(k) - \eta \cdot \frac{\partial J}{\partial \overline{y^l}} \tag{5}$$

$$\overline{x_i^l}(k+1) = \overline{x_i^l}(k) - \eta \cdot \frac{\partial J}{\partial \overline{x_i^l}} \tag{6}$$

$$\overline{\sigma_i^l}(k+1) = \sigma_i^l(k) - \eta \cdot \frac{\partial J}{\partial \sigma_i^l} \tag{7}$$

이 되고, 여기서 η는 학습율이다.

위 식에서 $\frac{\partial J}{\partial \overline{y^l}}$, $\frac{\partial J}{\partial \overline{x_i^l}}$, $\frac{\partial J}{\partial \sigma_i^l}$을 계산하기 위하여

$$a = \sum_{l=1}^{5} \overline{y^l} \cdot O^l \tag{8}$$

$$b = \sum_{l=1}^{5} O^l \tag{9}$$

로 정의하면 퍼지-신경회로망의 출력 $\hat{f}$는 식(10)로 된다.

$$\hat{f} = \frac{\sum_{l=1}^{5} \overline{y^l} \cdot O^l}{\sum_{l=1}^{5} O^l} = \frac{a}{b} \tag{10}$$

단, ℓ은 뉴런이 5인 경우로 가정한다.

$\eta \cdot \frac{\partial J}{\partial \overline{y^l}}$을 계산하여 식(5)에 대입하면 식(11)이 된다.

$$\overline{y^l}(k+1) = \overline{y^l}(k) - \eta \cdot [\hat{f} - f] \cdot \left(\frac{O^l}{b}\right) \tag{11}$$

$\eta \frac{\partial J}{\partial \overline{x_i^l}}$를 계산하여 식(6)에 대입하면 식(12)가 된다.

$$\begin{aligned} \overline{x^1}_i(k+1) &= \overline{x^1}_i(k) - \eta \cdot \frac{\partial J}{\partial \overline{x^1}_i} \\ &= \overline{x^1}_i(k) - \eta \cdot [\hat{f} - f] \cdot \frac{\overline{y^1} - \hat{f}}{b} \cdot O^1 \\ &\quad \cdot 2 \cdot \frac{(x_i - \overline{x_i^l})}{(\sigma_i^l)^2} \end{aligned} \tag{12}$$

또한 $\eta \frac{\partial J}{\partial \overline{x_i^l}}$를 계산하여 식 (7)에 대입하면 식(13)이 된다.

$$\begin{aligned} \sigma^1_i(k+1) &= \sigma^1_i(k) - \eta \cdot \frac{\partial J}{\partial \sigma^1_i} \\ &= \sigma^1_i(k) - \eta \cdot [\hat{f} - f] \cdot \frac{\overline{y^1} - \hat{f}}{b} \cdot O^1 \\ &\quad \cdot 2 \cdot \frac{(X_i - \overline{X^l}_i)^2}{(\sigma_i^l)^3} \end{aligned} \tag{13}$$

4. 제안한 혼합 지능제어 방식

교류 서보시스템의 고속·고정밀 속도제어를 위하여 혼합지능제어방식을 제안한다. 제안한 제어방식은 미리 설정된 오차값까지는 고속 제어를 위하여 퍼지-신경회로망 제어기를 이용하고, 설정된 오차 범위안에 들어오면 고정밀 제어를 위하여 PLL을 이용하는 혼합 지능제어 방식으로 전체적인 블록선도는 그림 4와 같다.

그림에서 fR과 fF는 각각 입력속도 신호와 피드백 속도이며, 제어기 선택기(control modes selector)는

신호의 오차에 따라 PLL 제어기와 퍼지-신경회로망 제어기를 프로그램상 선택하게 되며, 여기서 측정되어진 주파수오차(fR - fF)는 퍼지-신경회로망 제어기나 PLL제어기를 걸쳐 PWM인버터를 통해 모터속도제어를 한다.

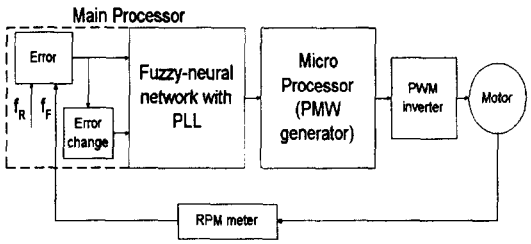


그림 4. 퍼지-신경회로망 방식과 PLL제어기를 이용한 블록선도
Fig. 4. Block diagram of fuzzy-neural network and PLL

전체적인 교류서보시스템은 NEC사의 V25 마이크로프로세서를 사용한 디지털 PWM 인버터가 사용되고, PLL제어기와 제어기 선택기 부분이 프로그램으로 구성되어, 교류서보시스템의 제어부분은 모두 프로그램으로 작성되고, 이렇게 구성된 프로그램이 단일화된 제어기로 간단하고 편리한 시스템동작을 할 수 있게 한다.

제안한 제어방식의 시스템동작 흐름선도는 그림 5와 같으며 주파수가 설정된 오차(ε)값내에 빠른 시간안에 들어 올 수 있도록 응답성능이 빠른 퍼지-신경회로망을 사용하여 동작을 하고, 주파수가 설정된 오차(ε)값내에 들어오면 시스템은 PLL동작으로 동작하게 된다. 여기서 속도 오차는 (fR -fF)로 표시되고, 모터가 동작하는 동안에 주기적인 샘플값과 컴퓨터에 의한 계산값으로 이루어진다. 샘플된 오차값이 설정값(ε)보다 낮아지면 시스템은 다시 퍼지-신경회로망제어기에서 동작하게 된다. 그 때의 모터속도는 PLL영역에서 동작하기위해 증가하거나 감소하게된다. PLL동작영역에서 모터가 동작할 때 비교주파수와 모터속도가 일치되기 때문에 아주 정밀한 조정값을 얻을 수 있다.

5. 시뮬레이션

4장에서 제안한 제어방식의 유용성을 입증하기 위해서 Pentium 100MHz PC상에서 C++언어와 MATLAB을 사용하여 80[ms]의 샘플링시간으로 시뮬레이션 하였다. 제어기로 사용된 퍼지-신경회로망의 소속함수의 수는 5개, 전건부 소속함수의 파라미터와 후건부 연결강도의 초기값은 각각 [0,1]사이의 랜덤값을 이용하였다. 학습률은 0.52로 하였고 설정오차는 10%이다

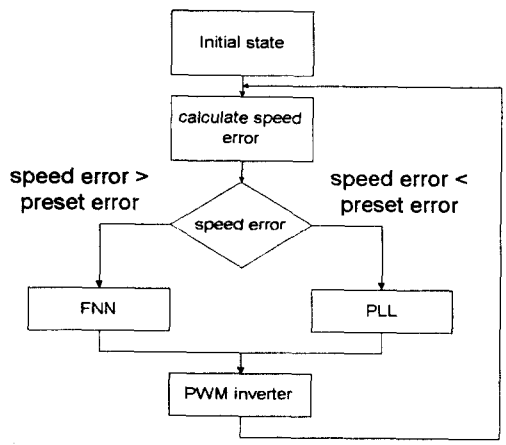


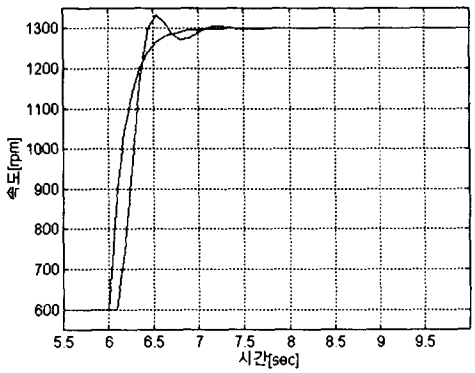
그림 5. 시스템동작 흐름선도
Fig. 5. Flowchart of systems operation

그림 6은 기준궤적 600[rpm]에서 1300[rpm]으로, 응답시간 0.25[s]에 대한 시스템의 퍼지-신경회로망 제어방식과 제안한 제어방식의 응답곡선이다.

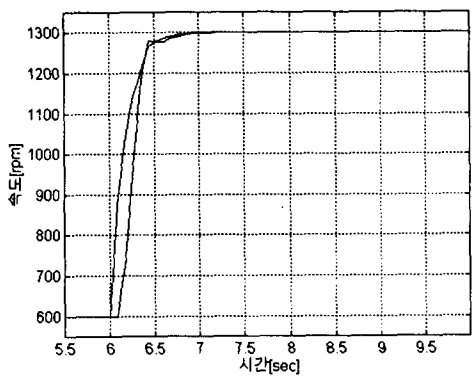
그림 6에서 요철없이 변화하는 선이 기준궤적이고 요철을 포함하여 변화는 것이 응답곡선이다. 그림 6(a)의 퍼지-신경회로망 제어방식의 응답곡선은 약간의 오버슈트가 발생하지만 그림 (b)의 제안한 제어방식에서는 PLL의 부가로인하여 오버슈트의 감소 및 빠른 응답특성을 나타내고 있다.

6. 실험 및 검토

제안한 제어방식에 대한 시뮬레이션 결과의 타당성을 실험으로 입증하기 위하여 제작한 실험장치의 블록선도는 그림 7이다.



(a) 퍼지-신경회로망 제어방식



(b)제안한 제어방식

그림 6. 각 제어기의 응답곡선
Fig. 6. Response curve of each control method

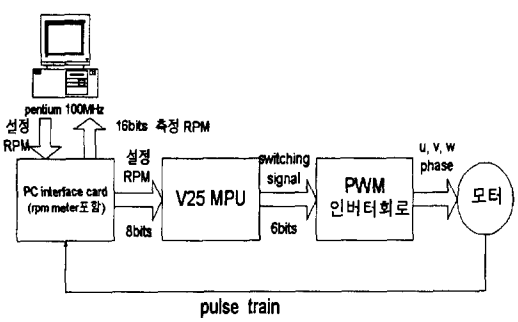


그림 7. 실험장치의 블럭선도.
Fig. 7. Block diagram of Experiment devices

그림 7에서 디지털 PWM 인버터의 주파수조정을 위해 Main Processor에서는 알고리즘연산을, V25 마이크로프로세서에서는 PWM파형을 발생하도록하는 병렬처리구조로 구성하였고, PLL동작은 Main Processor에서 프로그램으로 구현을 하였다. Main Processor에서 알고리즘을 C++언어로 작성하였고 샘플링 시간은 80[ms]로 하였다.

PWM 인버터회로는 IR2130을 사용하여 구성 하였고 스위칭을 포함한 회로도는 그림 8와 같다.

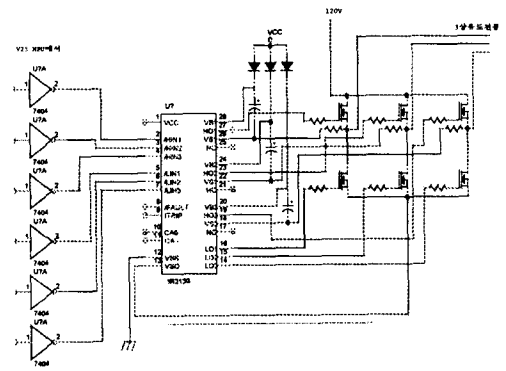


그림 8. 인버터 스위칭 회로도
Fig. 8. Scheme of inverter

이상과 같이 설계한 실험장치를 제작하였으며 그림 9는 실험장치 사진이다.

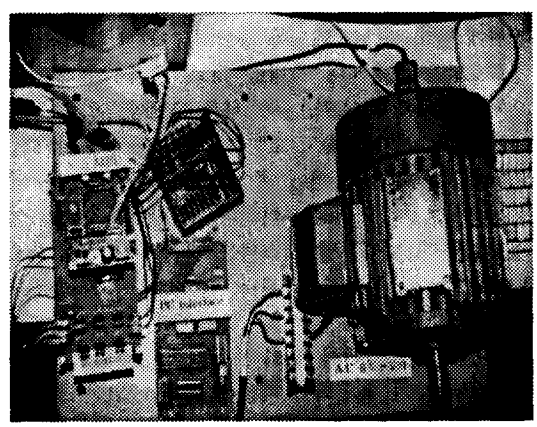


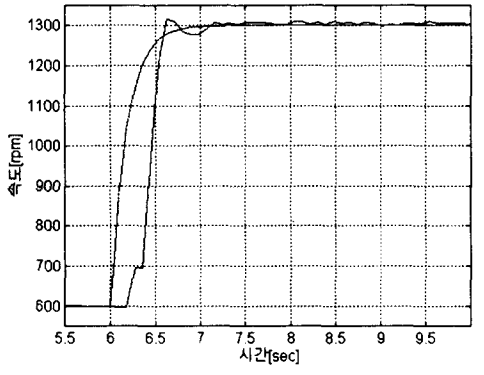
그림 9. 실험장치
Fig. 9. Experimental devices

3상유도전동기의 무부하 및 부하상태에서 속도제어 실험을 위한 실험조건은 표 1과 같다.

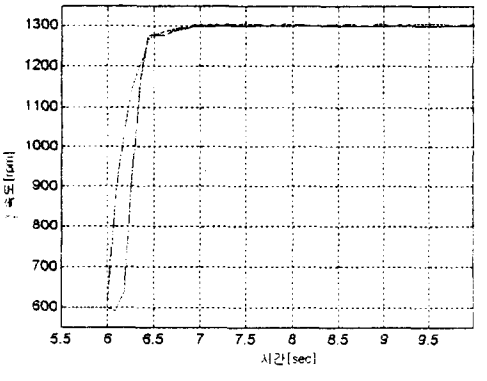
표 1. 실험조건
Table 1. Condition of experiment

부하상태	제어대상	입력전압	입 력 신 호
무부하	1마력 유도전동기	DC 120V	600rpm에서 1300rpm
1kg	1마력 유도전동기	DC 120V	600rpm에서 1300rpm

무부하상태에서의 가변속 기준궤적에 대한 퍼지-신경회로망제어방식과 제안된 제어방식의 응답특성은 그림 10이다.



(a)퍼지-신경회로망제어방식

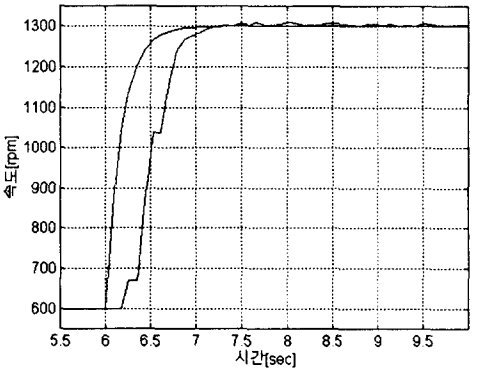


(b) 제안한 제어방식

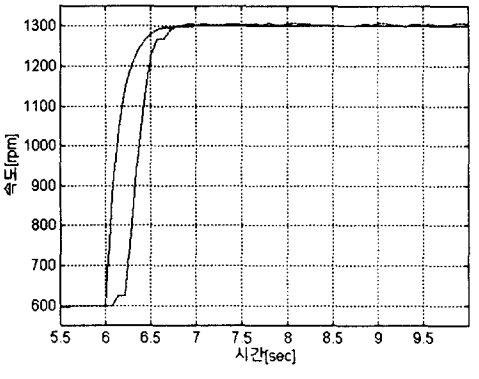
그림 10. 각 제어방식의 응답곡선
Fig. 10. Response curve of each control method

그림 10의 (a)는 퍼지-신경회로망제어방식, (b)는 제안한 제어방식의 응답곡선으로 제안된 제어방식은 오버슈트도 거의 없으며 속응성 및 정밀성이 개선됨을 알 수 있다.

그림 11은 1kg의 부하를 모터축에 커플링한 경우의 가변속제어의 응답곡선이다.



(a) 퍼지-신경회로망방식



(b) 제안한 제어방식

그림 11. 부하상에서 각 제어기의 응답곡선
Fig. 11. Response curve of each control method with load

그림 11 (a)는 부하상에서 퍼지-신경회로망제어방식, (b)는 부하상에서 제안한 제어방식의 응답곡선으로 제안된 제어방식은 (a)의 퍼지-신경회로제어방식보다 빠르고 안정된 응답특성을 나타내고 있다.

7. 결 론

교류서보시스템의 고속·고정밀 제어를 위하여 혼합형 지능제어 방식을 제안하였다. 제안한 제어 방식은 고속제어를 위하여 미리 설정된 오차값까지는 퍼지-신경회로망 제어 방식을 이용하고, 고정밀 제어를 위하여 설정된 오차범위 안에 들어오면 PLL제어 방식을 이용한 혼합형 지능제어 방식이다.

제안한 제어 방식의 유용성을 확인하기 위하여 3상유도전동기의 속도제어를 기존의 퍼지-신경회로망 제어 방식과 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제어성능을 비교 검토하였다.

비교 검토한 결과 무부하시나 부하시에도 제안된 제어방식은 기존의 퍼지-신경회로망 제어방식보다 오버슈트도 거의 없으며 속응성 및 정밀성이 개선됨을 확인하였다.

그러나 부하가 있을 때는 시스템의 지연으로 인한 응답특성이 조금 감소하였다. 이런 부분에 대해서는 앞으로 지능적인 우수한 식별기(Identifier)에 대한 연구 개발 및 이 식별기를 기반으로 응답이 빠른 교류서보시스템에 대한 제어기를 설계하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] B.K.Bose, "Power Electronics and DC Drivers", Prentice-Hall, 1986.

[2] I. Takahashi and N. Noguchi, "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor", IEEE Trans. On 2nd. Appl., Vol. 22, pp.820~827, Sept, 1986.

[3] CLARK, F.C, "PID algorithms and their computer implementation", Trans. Inst. Meas. Control, pp. 305~316, June, 1984.

[4] A. K. Toh, E. P. Nowicki, and F. Ashrafzadeh, "Flux Estimator for Field Oriented Control of induction Motor using an Artificial Neural Network", In Conf. Rec. IEEE Ind. Applicat. Soc. vol. 1, pp. 585~592, 1994.

[5] L. Ben-Brahim. "Motor Speed Identification in Neural Networks", IEEE ind. Applicat. 28~32, Jan/Jun 1995.

[6] Y. Hirashima, Y. Iiguni and N.Adachi, "An Adaptive Control Method using Neural Network", SYSTEM制御情報學會論文誌, Vol. 7, No. 8, pp.281~286, 1994.

[7] Y. E. Li, and C. C. Lau, "Development of fuzzy algorithms for servo systems", IEEE Control Systems Mag., vol.9, no.3, pp.65~72, Apr. 1989.

[8] H.Ying, "Practical Design of Nonlinear Fuzzy Controllers with Stability Analysis for Regulating Processes with Unknown Mathematical Models", Automatica, Vol. 30, No. 7, pp. 1185-1195 1994.

[9] Jefferey T. Spooner and Kavin M. Passino, "Stable Adaptive Control Using Fuzzy System and Neural Networks", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, VOL 4, No. 3, pp. 339-359, August, 1996.

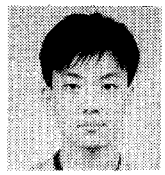
[10] J.G.Kuschewski, S.Hui and S.H.Zak, "Application of Feedforward Neural Networks to Dynamical System Identification and Control", IEEE Trans. CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, Vol. 1, No. 1, pp.37-49, March 1993.

[11] R. Moffat, P. C. Sen, R. Younker, and M. M. Bayoumi, "Digital phase-locked loop for induction motor speed control", IEEE Trans. Ind. Applications., vol. IA-15, no.2, pp.176-182, Mar/Apr., 1979.

[12] Jose Alvarez and Roger Countryman, "A Wide-Bandwidth Low-Voltage PLL for Power PC Microprocessors", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 30, No. 4, pp. 383-390, 1995.

◇著者紹介◇

이 현 관(李賢寬)
1961년 1월생. 1990년 Indiana State Uni. 전자공학과 졸업. 1991년 Indiana State Uni. 전자공학과 졸업(석사). 현재 동국대학교 전자공학과 박사과정. 호서전산현재 전문학교 정보통신공학과 교수.



김 진 식(金眞植)
1972년. 1996년 동국대학교 전자공학과 졸업. 1998년 동국대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1998년 동국대학교 전자공학과 입학(박사). 현재 경덕전자 연구원.

엄 기 환(嚴基煥)
1949년 10월 8일생. 1972년 동국대학교 전자공학과 졸업. 1985년 동국대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 현재 동국대학교 전자공학과 부교수.